



# Proposition d'interface Science-Société pour la gestion intégrée de la ressource en eau dans un contexte de changements climatiques

Eve Leroy

## ► To cite this version:

Eve Leroy. Proposition d'interface Science-Société pour la gestion intégrée de la ressource en eau dans un contexte de changements climatiques. Sciences de la Terre. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. <NNT : 2015GREAA011>. <tel-01241347>

**HAL Id: tel-01241347**

**<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01241347>**

Submitted on 10 Dec 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

**Eve LEROY**

Thèse dirigée par **Alain MARNÉZY** et  
codirigée par **Georges-Marie SAULNIER**

préparée au sein du **Laboratoire EDYTEM (Environnement  
Dynamiques et Territoires de Montagne)**  
dans l'**École Doctorale SISEO (Sciences et Ingénierie des  
Systèmes, de l'Environnement et des Organisations)**

# Proposition d'interface Science- Société pour la gestion intégrée de la ressource en eau dans un contexte de changements climatiques

Thèse soutenue publiquement le **12 juin 2015**,  
devant le jury composé de :

**Mr Sylvain BIGOT**

Professeur, Laboratoire LTHE, Université de Grenoble, Président

**Mme Florence HABETS**

Directrice de recherche, Laboratoire METIS, Université Pierre et Marie Curie,  
Rapporteur

**Mr Emmanuel REYNARD**

Professeur, Université de Lausanne, Rapporteur

**Mr Stefan SCHNEIDERBAUER**

Docteur, EURAC, Examineur

**Mr Bernard MICHON**

Conseiller départemental de l'Isère, Président de l'Espace Belledonne, Vice-  
Président du Grésivaudan, maire de Revel, Examineur

**Mr Georges-Marie SAULNIER**

Docteur, Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie, Co-directeur de thèse





---

## Remerciements

---

Deux mois après ma soutenance de thèse, voici le temps de remercier tous les amis, collègues et famille qui ont oeuvré plus ou moins dans l'ombre pour m'aider et me soutenir dans mes recherches.

Je tiens à remercier en tout premier lieu celui sans qui cette thèse n'aurait même pas vu le jour, qui s'est démené des prémices de mon projet jusqu'à l'aboutissement de celui-ci et qui continue à m'épauler. Le poto-mitan de cette thèse, le chêne, le bouclier, le roc, le soutien infaillible, le papa ours dont rêve chaque thésard et avant tout l'ami sincère : Georges-Marie Saulnier. On notera que je n'ai pas employé le qualificatif de "directeur de thèse" qui lui déplaît tant. Dans tous les cas, Georges-Marie agit comme un guide, laissant toujours le choix du chemin et du cheminement mais éclairant les zones d'ombres, apaisant les peurs et les tensions et permettant ainsi une recherche ouverte où rien n'est impossible. J'ai adoré travailler avec cette écoute toujours attentive et rebondir sur des idées plus ou moins folles, les interludes gastronomiques nous aidant parfois grandement dans notre créativité.

Je remercie ensuite les deux autres membres de notre groupe de travail, poétiquement regroupé sous le nom de FESS (Fonctionnement et Evolution des hydroSystèmes complexeS). D'abord Timothée Michon qui a été mon véritable maître JAVA et qui m'a tout appris des vicissitudes du langage informatique avec une didactique remarquable ! J'ai adoré venir poser mes questions, repartir avec pour objectif de mieux poser mes questions et finalement réfléchir ensemble sur de multiples problèmes pour en trouver toujours des solutions originales et constructives. Ensuite William Castaings qui de manière peut-être moins visible a néanmoins grandement contribué à cette thèse en cultivant mon esprit scientifique, en me conseillant sur différents aspects et en encourageant toujours le côté interdisciplinaire de celle-ci. À ce groupe FESS composé de Georges-Marie, William, Timothée et moi-même, je dois ce goût du travail collectif, du brainstorming improbable dont les meilleures idées sortent souvent autour d'un bon verre, du fait de croire éperdument que le partage et le dialogue nous font parcourir des chemins bien plus riches, bien plus intéressants et bien plus constructifs à plusieurs que seul et cela tant sur le point



professionnel que personnel.

De manière plus formelle, je remercie également le laboratoire EDYTEM, l'Université de Savoie et le projet européen C3-Alps du programme Espace Alpin qui m'ont fourni le cadre institutionnel pour mener à bien mes recherches. J'ai particulièrement apprécié l'ambiance de ce laboratoire EDYTEM, interdisciplinaire donc bouillonnant de différents points de vue. Je profite ici pour passer une spéciale dédicace aux doctorants avec qui j'ai partagé ces années de travaux : Marine, Camille, Lolo, Lise, Grégoire, Johan, Leïla, Mélanie, Charlotte, Anouck, Florence, avec qui j'ai partagé mon long règne de despote, Haixing, Manon, Géraldine et ceux que j'oublie pour les avoir moins croisés. La bonne ambiance et confiance entre doctorants a fait que c'était toujours un plaisir d'aller au labo. Un remerciement s'impose également pour Christine Carré qui se démène toujours pour organiser au mieux nos démarches administratives.

Je remercie également les différents membres de mon jury qui, de par leurs réflexions, ont su insuffler de nouveaux regards et analyses qui me permettront d'aller plus loin dans mes recherches. Merci donc à Sylvain Bigot qui a aussi été un des instigateurs de mon goût pour la géographie physique lors de mes années sur les bancs de la Fac de Grenoble. Merci à Emmanuel Reynard avec qui les échanges sur les modèles représentant la gestion de l'eau ont été toujours intéressants et constructifs. Merci à Florence Habets que je ne connaissais pas avant la soutenance et qui m'a éclairée sur différents aspects de l'hydrologie. Merci à Stefan Schneiderbauer qui a pris le temps de renouer avec le langage francophone pour relire toute la thèse et poser des questions pertinentes. Un remerciement particulier à Bernard Michon qui, bien que n'ayant pas l'habitude de participer à des jurys de thèse, a su prendre le temps dans un agenda chargé de lire, critiquer et apporter un regard essentiel à mon travail : celui des politiques.

D'un point de vue plus technique, je tiens à remercier la société TENEVIA qui a développé et mis à disposition le modèle hydrologique utilisé dans cette thèse. Plus spécifiquement je remercie Arnaud Brun et Thierry Barth pour leur aide dans l'application du modèle sur Megève. Je remercie également l'Observatoire de l'Eau en Montagne et particulièrement Aude Sourellat d'ASTER qui a été d'une aide précieuse pour la récupération et le transfert de données. J'ai aussi une pensée pour les services techniques de Megève (Régie des eaux et Société de Remontées Mécaniques) pour leurs explications sur le mode de fonctionnement de leurs services et les données fournies. Enfin, merci également à Marine Piolat, qui m'a grandement aidée dans la partie interface ludique de cette thèse.

Je remercie ici ma grand-mère, Marie-Joseph, mais que le monde ne connaît que sous le pseudonyme de mimi, qui a relu plusieurs fois (au moins 3 fois avéré mais certainement bien plus) et consulté jusqu'à trois dictionnaires différents pour être certaine de l'orthographe de ce manuscrit.

Enfin au-delà de cette sphère de travail dans laquelle je me suis épanouie dans la recherche, je souhaite remercier tout un tas de personnes qui ont contribué de manière indirecte à ma thèse tout simplement en me rendant heureuse. Et tout le monde sait que quelqu'un d'heureux, travaille mieux ! Merci donc (en vrac) : aux copains Charline, Marine, Florian, Aurélien, Ophélie, Anne-Charlotte-Bibiche, Cécile, Camille, Aurore, Valentin, etc. qui sont des générateurs de bonne-humeur instantanée et que j'ai toujours énormément de plaisir à voir. Ils contribuent à mon

équilibre.

Au club sportif de Bourgoin-Jallieu handisport et spécialement, Rudi, Maryse, Bernard, Albino, Didier et Jean-Claude avec qui nous avons partagé une aventure extraordinaire au Groenland et que j'ai toujours plaisir à retrouver aux entraînements. Mention spéciale à Rudi qui sait, à l'instar de Georges-Marie, me pousser cette fois-ci à aller chercher le meilleur pour le sport.

Un grand merci également à Doudou Siméon, l'Homme aux multiples facettes, il est à la fois un soutien psychologique, logistique, technique, physique, mécanique, sentimental , etc. Bref il m'accompagne dans tous les aspects de ma vie et me supporte au quotidien ce qui n'est déjà pas rien !

Enfin un grand merci à ma famille toujours d'un soutien sans faille dans toutes mes entreprises personnelles et professionnelles : mes parents Christine et Philippe, mes frères et soeurs Etienne et Clémentine, mon oncle plus discret Gérard ainsi qu'une nouvelle fois ma grand-mère.

*À ma grand-mère*



---

## Résumé

---

L'eau est un besoin vital pour l'Homme et chaque société se doit de la gérer au mieux pour subvenir à ce besoin élémentaire aujourd'hui et dans l'avenir. Les changements climatiques en cours et en particulier le réchauffement climatique influencent fortement les hydrosystèmes et les activités économiques de montagne forçant ces territoires à s'adapter à ces nouvelles conditions. Les choix de développement socio-économiques ont également une importance prépondérante dans l'émergence ou non de pénuries d'eau. Au cours de cette thèse un modèle couplant représentations des ressources naturelles et des activités socio-économiques a été construit. Il permet d'explorer les impacts sur la disponibilité des ressources en eau, à la fois des changements climatiques et des choix socio-économiques, pour un territoire de montagne et à différents horizons temporels. Toutes les combinaisons de scénarios climatiques et socio-économiques peuvent être expérimentées dans le modèle. La station de ski de Megève (France) a servi de terrain d'application pour le développement du modèle hydro-anthropique. Ce modèle se proposant de servir d'aide à la décision pour la mise en place de politiques d'adaptation, la délicate question du transfert de connaissances entre Science et Société est interrogée. Via l'insertion du modèle scientifique développé dans des Serious-Game une proposition d'interface est réalisée. A travers le projet C3-Alps qui a financé cette thèse, d'autres transferts de connaissances pour l'adaptation aux changements climatiques dans les Alpes ont également été réalisés.

Mots-clés : gestion durable de l'eau, adaptation aux changements climatiques, modèle hydro-anthropique, Science-Société, Serious-Game, Alpes



---

## Abstract

---

Water is a vital need for Human and each society have to manage it at best to meet this basic need today and in the future. Current climatic changes and especially global warming strongly impact hydrosystems and economical activities of mountainous areas, forcing these territories to adapt to these new conditions. Socio-economic development choices have also a great importance in water shortages occurrence. In this thesis a model coupling representations of water resources and socio-economic activities was built. It allows to explore both climate change impacts and socio-economic choices impacts on water resources availability in a mountain territories at different time scales. All combinations of climate change and socio economic choices scenarios are testable. The Megève ski resort station in France was used to develop and apply the hydro-anthropic model. The latter must contribute as a decision support tool for climate change adaptation policies development. Therefore, the tricky question of knowledge transfer between Science and Society is addressed in this thesis. The scientific model developed was introduced in Serious-Games as an interface proposal. Through the C3-Alps project which financed this thesis, others knowledge transfers for climate change adaptation in the Alps were also addressed.

Keywords : sustainable water management, climate change adaptation, hydro-anthropic model, Science-Society, Serious-Game, Alps



---

## Table des matières

---

<b>Remerciements</b>	<b>iii</b>
<b>Résumé</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Table des figures</b>	<b>xv</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xix</b>
<b>Glossaire de la gestion administrative de l'eau</b>	<b>xxi</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
 <b>Première partie    L'adaptation au changement climatique, le nouveau défi des territoires alpins</b>	 <b>5</b>
<b>A    La gestion de l'eau en France une organisation administrative complexe en évolution</b>	<b>7</b>
A - I    Une organisation administrative complexe . . . . .	7
A - I - 1    Rapide historique d'une organisation de l'eau territorialisée . . . . .	8
A - I - 2    L'organisation administrative actuelle . . . . .	8
A - II    Une organisation administrative en mutation . . . . .	15
A - II - 1    Vers une déconcentration et une décentralisation . . . . .	15
A - II - 2    Une organisation en évolution engendrant des chevauchements de compétences . . . . .	15
A - III    Conclusion . . . . .	18



<b>B</b>	<b>Un climat en évolution</b>	<b>19</b>
B - I	Les effets du changement climatique constatés . . . . .	19
B - I - 1	Évolutions récentes des températures dans les Alpes . . . . .	20
B - I - 2	Évolutions récentes des précipitations dans les Alpes . . . . .	22
B - I - 3	Évolutions récentes du manteau neigeux dans les Alpes . . . . .	23
B - I - 4	Scénarios et perspectives d'évolution des précipitations et températures dans les Alpes . . . . .	24
B - II	Les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau dans les Alpes	27
B - II - 1	Caractéristiques des hydrosystèmes alpins . . . . .	27
B - II - 2	Impacts des changements climatiques sur les hydrosystèmes alpins . .	29
B - II - 3	Impacts des évolutions des hydrosystèmes alpins dues aux changements climatiques sur la gestion de l'eau actuelle et future . . . . .	32
B - III	Conclusion . . . . .	33
<b>C</b>	<b>Les réponses politiques aux changements climatiques : atténuation et adaptation</b>	<b>35</b>
C - I	L'atténuation des changements climatiques . . . . .	35
C - I - 1	La réponse la plus ancienne . . . . .	35
C - I - 2	Les politiques d'atténuation aux changements climatiques en France .	37
C - II	L'adaptation aux changements climatiques . . . . .	38
C - II - 1	Le résultat d'un constat : l'atténuation n'est pas suffisante . . . . .	38
C - II - 2	Les politiques d'adaptation en France . . . . .	39
C - II - 3	L'adaptation dans les Alpes : rapide état des lieux . . . . .	41
C - III	Le projet européen C3-Alps . . . . .	43
C - IV	Conclusion . . . . .	45
	 <b>Deuxième partie</b>	 <b>47</b>
<b>D</b>	<b>Méthodologie : le choix de la modélisation</b>	<b>49</b>
D - I	Évaluation des besoins . . . . .	49
D - I - 1	Identification des pénuries . . . . .	49
D - I - 2	Gestion du partage des usages de l'eau . . . . .	51
D - I - 3	Prévisions des évolutions futures . . . . .	52
D - I - 4	Stratégies d'adaptation aux changements climatiques . . . . .	53
D - II	Le choix d'un modèle pour éviter les pénuries d'eau et explorer les stratégies d'adaptation . . . . .	53
D - II - 1	Un modèle qu'est-ce que c'est ? . . . . .	53
D - II - 2	Intérêt de l'utilisation d'un modèle pour l'adaptation aux changements climatiques dans le domaine de la gestion de l'eau . . . . .	54
D - II - 3	Les différents types de modèles existants sur cette thématique . . . .	55
D - II - 4	Quelques exemples d'utilisation des modèles pour la gestion durable de l'eau en milieu de montagne . . . . .	57
D - III	Conclusion . . . . .	60

<b>E</b>	<b>Fonctionnement du modèle couplé</b>	<b>61</b>
E - I	Le concept du modèle couplé . . . . .	63
E - II	Le module hydrologique : représente le milieu naturel . . . . .	64
E - III	Le module anthropique : représente les usages de la ressource en eau . . . . .	65
E - III - 1	La Régie des eaux <i>virtuelle</i> . . . . .	65
E - III - 2	L'hydroélectricité . . . . .	72
E - III - 3	L'alimentation en eau potable . . . . .	73
E - III - 4	La neige artificielle . . . . .	77
E - III - 5	L'agriculture . . . . .	85
E - IV	Conclusion . . . . .	86
<b>F</b>	<b>Application du modèle à Megève</b>	<b>89</b>
F - I	Problématique de la gestion de l'eau à Megève . . . . .	89
F - I - 1	Rapide historique de Megève . . . . .	89
F - I - 2	Le climat de Megève . . . . .	90
F - I - 3	Les activités socio-économiques de Megève . . . . .	91
F - I - 4	Partage de l'eau à Megève et dans GemEve . . . . .	95
F - II	Les données utilisées . . . . .	97
F - II - 1	Les données hydro-météo . . . . .	97
F - II - 2	Les données anthropiques . . . . .	101
F - III	Mise en œuvre du modèle . . . . .	106
F - III - 1	Résultats globaux . . . . .	106
F - III - 2	Distribution des captages et réservoirs . . . . .	109
F - III - 3	Consommations d'eau par les différents usages . . . . .	110
F - III - 4	Les abonnés domestiques . . . . .	113
F - III - 5	La production de neige artificielle . . . . .	115
F - IV	Conclusion . . . . .	118
<b>G</b>	<b>Discussion et perspectives</b>	<b>119</b>
G - I	Intérêt du modèle sur le temps présent . . . . .	119
G - II	Intérêt du modèle pour le temps futur . . . . .	122
G - II - 1	Exploration des évolutions socio-économiques . . . . .	123
G - II - 2	Exploration des évolutions climatiques . . . . .	124
G - II - 3	Exemple de scénarios appliqués à GemEve . . . . .	125
G - III	Perspectives . . . . .	136
<b>Troisième partie Interface Science-Société</b>		<b>139</b>
<b>H</b>	<b>Diffusion des savoirs, la clé de l'adaptation au changement climatique</b>	<b>141</b>
H - I	La communication sur le changement climatique : un défi difficile à relever . . . . .	142
H - I - 1	Les difficultés de communiquer la problématique du changement climatique liées à la nature du phénomène . . . . .	142

H - I - 2	Les pièges à éviter . . . . .	144
H - II	Les résultats de C3-Alps . . . . .	146
H - II - 1	Simplification de l'accès à l'information par des outils de synthèse . . . . .	146
H - II - 2	Les sites pilotes pour la mise en place de l'adaptation au changement climatique local . . . . .	149
H - III	Conclusion . . . . .	151
<b>I</b>	<b>Les Serious-Game, nouvel interface Science-Société ?</b>	<b>153</b>
I - I	L'émergence du projet . . . . .	153
I - II	L'utilisation du jeu dans l'apprentissage . . . . .	153
I - III	Le jeu de plateau . . . . .	156
I - III - 1	Les objectifs . . . . .	158
I - III - 2	Les règles du jeu . . . . .	158
I - III - 3	Mise en œuvre du jeu et résultats . . . . .	161
I - IV	L'adaptation de GemEve en Serious-Game . . . . .	163
I - IV - 1	Intérêt des Serious-Games . . . . .	163
I - IV - 2	Développement du Serious-Game utilisant le modèle GemEve . . . . .	166
I - V	Conclusion . . . . .	170
	<b>Conclusion générale</b>	<b>173</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>190</b>

---

## Table des figures

---

A.1	Les 7 grands bassins hydrographiques et 5 bassins ultramarins français . . . . .	11
A.2	Système de prélèvements et de redistribution des redevances de l'Agence de l'Eau sur le principe <i>pollueur-payeur</i> et <i>préleveur-payeur</i> . . . . .	12
A.3	Récapitulatif des principaux acteurs de la gestion de l'eau en France (sauf associations) ainsi que les documents de planification principaux . . . . .	17
B.1	Températures homogénéisées de la grande région alpine (GAR) de 1767 à 2003 et températures moyennes de l'hémisphère Nord (N-HEM) de 1856 à 2003, différences entre les anomalies de températures de la GAR par rapport à la moyenne de la période 1901-2000 avec les anomalies de températures de N-HEM pour la même période . . . . .	21
B.2	Évolution des précipitations de la région alpine de 1800 à 2007 en pourcentage des valeurs moyennes de la période 1901-2000 . . . . .	22
B.3	Évolution de la hauteur de neige moyenne mesurée entre le 11 et le 20 février et du nombre de jours sans neige au sol en hiver au col de Porte de 1960 à 2003 . . . . .	24
B.4	Comparaison des températures prévues par le scénario du GIEC A1B et des températures extrapolées des données HistAlp de 1900 à 2100 . . . . .	25
B.5	Évolution du ratio pluie/neige en hiver due à l'augmentation des températures alpines . . . . .	26
B.6	Les 16 types de régimes hydrologiques de la Suisse . . . . .	29
B.7	Évolution du régime hydrologique de la Simme (Suisse) dans les conditions météorologiques de 2035 et de 2085 . . . . .	30
B.8	Évolution des régimes hydrologiques du bassin versant d'Aletsch et Trift pour 4 périodes : 1960-1969, 1980-2009, 2020-2049, 2070-2099 . . . . .	31
C.1	État des lieux du respect des engagements des pays signataires de la première période du protocole Kyoto en 2007 . . . . .	36
C.2	Évolution des émissions de gaz à effet de serre de la France de 1990 à 2012 . . . . .	38

C.3	Deux réponses politiques aux changements climatiques : l'atténuation et l'adaptation . . . . .	40
C.4	Différentes mesures d'adaptation imaginées pour les Alpes . . . . .	42
C.5	Les régions des sept pays de l'Espace Alpin . . . . .	44
D.1	Les différentes sources de pénuries d'eau . . . . .	50
D.2	Différentes échelles temporelles à prendre en compte dans l'outil de gestion durable des ressources en eau en fonction des actions souhaitées . . . . .	52
D.3	Fonctionnement basique d'un modèle numérique . . . . .	54
D.4	Organisation du projet MontanAqua . . . . .	60
E.1	Organisation schématique du modèle couplé . . . . .	62
E.2	Représentation schématique des trois éléments constituant le réseau d'alimentation en eau . . . . .	67
E.3	Turbine, incluse dans le réseau d'eau potable, utilisée à Megève . . . . .	73
E.4	Prélèvements moyens mensuels sur 2003, 2004 et 2005 en eau potable des stations touristiques et des autres communes du bassin versant du Giffre . . . . .	74
E.5	Courbe journalière de la consommation à Paris . . . . .	75
E.6	Solutions artisanales pour enneiger les pistes de la station des Gets (Haute-Savoie) pendant l'hiver 1963-1964 . . . . .	77
E.7	Évolution de la surface enneigée et de la puissance des enneigeurs installés et du nombre de stations de sports d'hiver équipées d'enneigeurs sur le territoire français . . . . .	78
E.8	Les phases de production de la neige artificielle à partir d'un enneigeur . . . . .	80
E.9	Évolution du nombre de retenues d'altitude depuis 1970 en Savoie et Haute-Savoie . . . . .	81
E.10	Interconnexion des sources d'approvisionnement d'eau pour les unités de production de neige . . . . .	82
E.11	Évolution de la consommation électrique pour la production de neige de l'hiver 1993-1994 à l'hiver 2006-2007 . . . . .	83
F.1	Megève une municipalité des Alpes françaises . . . . .	90
F.2	Évolution de la population de Megève entre 1968 et 2011 . . . . .	91
F.3	Diagramme ombrothermique et régime hydrologique de Megève . . . . .	92
F.4	Production d'hydroélectricité de Megève en Kwh (janvier 2012- août 2013) . . . . .	94
F.5	Températures et précipitations moyennes enregistrées à Megève depuis 2009 . . . . .	97
F.6	Débits mesurés pour le bassin de versant sur le Glappet et le Planay de juin 2009 à juillet 2013 . . . . .	98
F.7	Évolution des température, précipitations (mesurées) et du stock de neige (simulé) à Megève de 2009 à 2013 . . . . .	99
F.8	Représentation des aires drainées par captage dans le modèle . . . . .	100
F.9	Consommations de la turbine hydroélectrique de Megève pour 2011, 2012 et 2013 . . . . .	103
F.10	Reconstitution d'une chronique touristique typique d'une station de sport d'hiver de moyenne montagne à partir d'éléments annuels et des semaines de vacances académiques françaises (2012) . . . . .	104
F.11	Éléments de comparaison pour la validation de la reconstitution de la chronique touristique . . . . .	105

F.12 Comparaison entre les cumuls annuels consommés par usage modélisés dans GemEve et les données annuelles de la régie des eaux pour 2010, 2011 et 2012 . . . . .	107
F.13 Répartition de la distribution d'eau par captage de GemEve et de la régie des eaux de Megève . . . . .	109
F.14 Demandes en eau mensuelles moyennes dans GemEve . . . . .	111
F.15 Consommations d'eau mensuelles moyennes d'hydroélectricité de GemEve comparées à la moyenne mensuelle des volumes turbinés par la régie des eaux . . . . .	112
F.16 Évolution de la demande en eau par usage et par saison de GemEve (hors hydro-électricité) . . . . .	113
F.17 Demandes en eau non satisfaites dans GemEve . . . . .	114
F.18 Consommation des touristes d'octobre 2011 à août 2013 estimée par GemEve et comparée à l'estimation des distributions de la régie des eaux pour l'AEP touristique	115
F.19 Hauteurs de neige simulées pour GemEve de 2009 à 2013 . . . . .	117
F.20 Volumes d'eau utilisés pour produire de la neige mesurés par la société de remontées mécaniques de Megève et calculés par le modèle pour GemEve pour les hivers 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013 . . . . .	117
G.1 Résultats de la répartition de la distribution des captages suite à une simulation de pollution des captages de la Radaz et de Plaine Joux et une simulation de panne du Planay dans GemEve comparé au fonctionnement normal du modèle et de la Régie des Eaux de Megève . . . . .	121
G.2 Apparition de pénuries en février et avril 2011 lors de la simulation de panne du captage du Planay dans GemEve . . . . .	122
G.3 Évolution des précipitations et des températures sur quatre hivers en 2050 selon deux scénarios climatiques . . . . .	126
G.4 Débits moyen mensuels pour les deux scénarios climatiques explorés pour la période 2050 comparés aux débits actuels . . . . .	127
G.5 Évolution des consommations des usages hydroélectricité et neige de culture en 2050 sous deux scénarios climatiques. Présentation des résultats spécifiques pour l'usage hydroélectricité et l'usage neige de culture . . . . .	129
G.6 Hauteurs de neige et fenêtres de froids dans les conditions climatiques actuelles et dans les conditions climatiques de 2050 . . . . .	130
G.7 Évolution du nombre de jours d'ouverture de piste et du volume d'eau consommé par les enneigeurs en fonction du débit maximum des enneigeurs dans les conditions climatiques de 2050 . . . . .	132
G.8 Évolution du nombre de jours d'ouverture de piste en fonction du débit maximum des enneigeurs dans les conditions climatiques de 2050 sans limitation de stock d'eau disponible . . . . .	132
G.9 Évolution du nombre de jours d'ouverture de piste et du volume d'eau consommé par les enneigeurs en fonction du débit maximum des enneigeurs dans les conditions climatiques de 2050 avec une production de neige artificielle de 17h à 8h du matin et une température de déclenchement des canons à neige de -2°C et de -1°C. . . . .	133

G.10	Évolution des consommations des usages dans un scénario anthropique sans exploitation de la station de ski hivernale, avec une augmentation de la population touristique estivale de 50%	135
H.1	Résultat du sondage d'opinion sur l'importance de l'impact du changement climatique	143
H.2	Objectifs de la base de données C3-Alps	147
H.3	Calendrier de mesures préconisées par le programme C3-Alps	150
I.1	Ecran type du code développé pour le modèle GemEve	154
I.2	Plateau de jeu explicitant la difficulté de la gestion de l'eau dans un contexte de changement climatique	157
I.3	Test du jeu pendant la fête de la science 2013 à Chambéry	161
I.4	Interface du Serious-Game et représentation de la population résidente par la taille du village	167
I.5	Différentes situations du Serious-Game	169
I.6	Le juste milieu à trouver pour susciter le <i>flow</i> chez le joueur	170

---

## Liste des tableaux

---

E.1	Consommations en litre appliquées à chaque heure pour le calcul de la consommation d'eau potable . . . . .	76
F.1	Données de synthèse sur les distributions annuelles d'eau présentées dans les Rapports Publics sur la Qualité de l'eau et des Services de Megève . . . . .	102
F.2	Valeurs clés de la reconstruction de la chronique de touristes pour GemEve . . .	105
F.3	Différences entre les volumes modélisés par GemEve et les volumes mesurés par la Régie des Eaux (en m <sup>3</sup> ) . . . . .	108
I.1	Cartes à tirer, dans le jeu de plateau, à chaque changement de saison . . . . .	160





---

## Glossaire de la gestion administrative de l'eau

---

ARS : Agence Régionale de Santé

CDERST : Conseil Départemental de l'Environnement et des Risques Sanitaires et Technologiques

CLE : Commission Locale de l'Eau

CNE : Conseil National de l'Eau

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

DDCSPP : Direction Départementale de la Cohésion sociale et de la Protection des Populations

DDPP : Direction Départementale de la Protection des Populations

DDT : Direction Départementale des Territoires

DEB : Direction de l'Eau et de la Biodiversité

DRAFF : Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement

EPTB : Établissement Public Territorial de Bassin

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

LEMA : Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques

MEDDE : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie

MIE : Mission Interministérielle de l'Eau

MISEN : Mission Inter-Services de l'Eau et de la Nature

ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques  
ONERC : Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique  
PAOT : Plan d'Action Opérationnel Territorial  
PCET : Plan Climat Énergie Territorial  
PDM : Programme de Mesures  
PIAE : Programme d'Intervention de l'Agence de l'Eau  
PNACC : Plan National d'Adaptation au Changement Climatique  
SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux  
SDAGE : Schéma Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux  
SIE : Système national d'Information sur l'Eau  
SRCAE : Schéma Régional du Climat de l'Air et de l'Energie

---

## Introduction générale

---

L'eau est un besoin vital pour l'Homme et la bonne gestion de cette ressource est indispensable pour chaque société. Dans le contexte actuel d'évolutions climatiques et socio-économiques, de nombreuses questions se posent pour une gestion optimale de la ressource en eau. Ces questions ont été soulevées à de maintes reprises et dans différents contextes, par des scientifiques soucieux de mettre en avant les défis représentés par le changement climatique, par des économistes cherchant de nouveaux axes de développement pour des territoires sujets à ces impacts, par des décideurs politiques nationaux ou locaux devant développer ou appliquer des législations précises pour la gestion de l'eau, ou tout simplement par chaque citoyen quelque peu intéressé par le développement durable.

Quel sera l'impact des changements climatiques constatés sur les ressources en eau actuelles ? Comment estimer l'impact des changements de législation sur nos activités socio-économiques ? Le modèle de développement actuel sera-t-il viable dans le futur ? Jusqu'à quand ? De quel manière peut-on le faire évoluer pour qu'il soit durable ? sont autant de questions évoquées quand il s'agit de la gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique.

Cette gestion durable et intégrée des ressources en eau possède deux facettes. L'une d'elle est la quantité d'eau du milieu disponible pour l'exploitation par l'Homme. Cette quantité d'eau est déterminée par les différentes réserves d'un hydrosystème. Elle est donc très sujette aux paramètres climatiques tels que les températures et les précipitations. Les changements climatiques à l'œuvre ont donc un rôle important dans l'évolution des quantités d'eau exploitables par l'Homme. C'est alors un élément à étudier avec attention lorsqu'on s'intéresse à la gestion durable de l'eau.

L'autre facette est composée des activités socio-économiques d'un territoire. Ces dernières recouvrent un vaste ensemble d'éléments divers tels que les législations sur l'eau, les activités économiques nécessitant de l'eau, les besoins vitaux humains, etc. De part l'exploitation des ressources en eau du milieu, les activités socio-économiques d'un territoire influent sur la durabilité de leur gestion. La question de la gestion intégrée dans le sens d'un accès égalitaire à l'eau est

également un paramètre important à prendre en compte.

Pour répondre à ces problématiques actuelles et futures déjà soulevées depuis plusieurs années, quels sont les outils existants à notre disposition ? Tout d'abord, les régies des eaux et les services de gestion de l'eau locaux et départementaux, disposent d'un savoir technique essentiel pour connaître l'utilisation de l'eau par les différentes activités socio-économiques d'un territoire, ainsi que les caractéristiques des sources et du réseau d'alimentation en eau potable. Dans la problématique qui nous intéresse, leur savoir peut être particulièrement intéressant pour déterminer les possibilités d'évolution du stockage ou de l'adduction d'eau pour les différentes activités socio-économiques d'un territoire.

Pour explorer l'autre facette de la gestion durable et intégrée des ressources en eau, c'est-à-dire l'impact des changements climatiques, les modèles hydrologiques peuvent être utilisés. Ces modèles représentent le fonctionnement des écoulements sur un bassin versant en fonction des données météorologiques telles que la température et les précipitations. En appliquant des scénarios climatiques, les impacts de ces derniers sur les ressources hydrologiques d'un territoire peuvent être connus grâce à ce type d'outils.

Ainsi, pour engager des réflexions sur la durabilité d'un modèle de gestion de l'eau, le croisement des résultats de modèles hydrologiques et des données provenant des services de gestion de l'eau peut être effectué. Il est par exemple possible de déterminer selon différents scénarios climatiques l'impact de choix de développement, e.g. le maintien du tourisme hivernal intensif dans les Alpes, sur un territoire donné. En effectuant une simple analyse besoins-ressources grâce aux connaissances des services de l'eau et aux sorties de modèles hydrologiques des résultats intéressants peuvent être dégagés.

Cette solution envisageable fait néanmoins intervenir un grand nombre d'acteurs pour un scénario donné. Il faut tout d'abord disposer d'observations de terrain suffisantes pour quantifier les ressources en eau naturelles du territoire étudié. Ainsi les gestionnaires désireux de répondre à ces problématiques devront s'adresser à un bureau d'étude ou à une université pour renseigner cette question. Puis, le fonctionnement de l'approvisionnement de l'eau de ce territoire ainsi que les données de consommations socio-économiques devront être ajoutées à l'étude. Les résultats trouvés seront alors valables pour une mission précise et à un instant donné. Or, par définition le futur est incertain et les possibilités d'évolutions, d'adaptations et de développements extrêmement diverses. Comment prendre en compte la multiplicité des scénarios futurs envisageables ? Comment par exemple pouvoir à la fois étudier l'impact d'un changement de profil touristique ? Le retour à une économie liée à l'agropastoralisme ? Les différentes intensités d'impacts de changement climatique envisagées ? Les possibilités d'évolution du réseau d'alimentation en eau comme l'ajout d'un nouveau réservoir sur le territoire ? etc.

Les outils habituellement à disposition des gestionnaires et de leurs partenaires ne permettent pas toujours d'étudier cette multiplicité au sein d'une même étude. La question des croisements de scénarios divers apparaît complexe. Comment répondre à la fois à la question de l'impact de différents scénarios climatiques, de l'impact de différents choix de développement socio-économiques et de l'impact de différents choix techniques et législatifs ?

Au vue des problématiques actuelles, il y a un intérêt scientifique certain à interroger cette

question de la représentation et de l'exploration de scénarios variés, appartenant à des champs disciplinaires distincts. Il y a aussi un intérêt sociétal à développer un outil permettant de mieux anticiper et gérer les défis actuels et en devenir de la gestion intégrée de l'eau. La gestion intégrée de l'eau se définissant comme une prise en compte globale de l'élément eau, comme vue au chapitre A, implique des champs de compétences variés allant de la connaissance du fonctionnement naturel des ressources en eau, à la connaissance des saisonnalités de consommation des différents usages de l'eau, en passant par la connaissance technique des moyens d'acheminer cette ressource aux consommateurs sans oublier la connaissance juridique et législative encadrant ces pratiques. De plus, l'ensemble de ces connaissances serait peu utile si non appliqué au besoin de la société. Il faut donc aborder la question du transfert des connaissances entre scientifiques et société pour parvenir au développement d'un outil utile et efficace.

Cette thèse se pose donc à l'interface entre Science et Société. *Science* pour développer un outil original, suffisamment robuste pour interroger plusieurs problématiques liées à la gestion de l'eau dans un même logiciel. Ce dernier doit permettre d'apporter un éclairage sur les possibilités d'adaptation dans le domaine de la gestion de l'eau dans un contexte de changements climatiques. *Société* car cet outil scientifique doit être abordable et utilisable directement par les acteurs de la société pour promouvoir une gestion intégrée de l'eau. La question de l'innovation de l'outil scientifique développé, au sens de rendre accessible la connaissance produite scientifiquement pour son utilisation dans la société, est donc également interrogée dans cette thèse.

Le projet de l'Espace Alpin C3-Alps qui a financé cette thèse et dont certains résultats sont présentés en chapitre F s'est intéressé à transférer la connaissance déjà existante et abondante sur l'impact des changements climatiques dans les Alpes afin de favoriser la mise en place de mesures d'adaptation sur ce territoire. Les Alpes sont en effet particulièrement sensibles aux changements climatiques (chapitre B) et nécessitent une attention particulière pour y développer les premières mesures d'adaptation nécessaires pour anticiper les impacts des changements climatiques sur les activités socio-économiques (chapitre C). Ainsi pour cette thèse le territoire de Megève a servi de terrain d'étude pour estimer le potentiel de notre démarche sur un territoire sensible au changement climatique.

Pour ce faire il faut premièrement établir un état des lieux des conditions de la gestion de l'eau en France dans un contexte de changement climatique. C'est ce qui est réalisé dans la [Première partie](#) de cette thèse. Dans la [Deuxième partie](#), le développement d'un modèle hydrologique et anthropique permettant de questionner différents aspects de la gestion de l'eau et de son évolution possible dans un contexte climatique en mutation est présenté. La méthodologie (chapitre D), le fonctionnement (chapitre E) ainsi que l'application à Megève (chapitre F) sont développées dans cette partie conclue par les potentiels représentés par ce modèle pour la gestion de l'eau intégrée et l'adaptation au changement climatique (chapitre G). La [Troisième partie](#) aborde la question du transfert de ce modèle pour son utilisation par la société. Fort de l'analyse de la complexité administrative de la gestion de l'eau (chapitre A) et des difficultés liées à la communication du changement climatique (chapitre H), une stratégie originale a été choisie pour transférer le modèle de cette thèse à la société : les Serious-Games (chapitre I).



Première partie

# **L'adaptation au changement climatique, le nouveau défi des territoires alpins**





## CHAPITRE A

---

### La gestion de l'eau en France une organisation administrative complexe en évolution

---

Dans le cadre du projet Alpin C3-Alps, chacun des représentants des pays impliqués avait pour mission de collecter les informations sur la gestion des ressources en eau au niveau national en vue de son adaptation aux changements climatiques. Le résumé de ce travail bibliographique a été produit et diffusé au sein du projet C3-Alps. Ce chapitre se propose de détailler l'ensemble des analyses documentaires effectuées.

La gestion administrative française se caractérise par une grande complexité et une évolution constante et rapide. Ce constat nous a amené à reconsidérer la stratégie initiale de nos recherches. Plutôt que de collaborer de façon privilégiée avec un ou plusieurs échelons administratifs de la gestion de l'eau, nous verrons dans la suite de cette thèse que nous avons plutôt favorisé des approches indépendantes, destinées à être utilisées par l'ensemble des différents acteurs (y compris citoyen), quelque soit l'étendue de leurs responsabilités. Le chapitre I expose en détail notre proposition.

#### A - I Une organisation administrative complexe

En France, l'eau est définie dans une loi de 1992, comme un patrimoine commun à la Nation. De fait cette ressource n'appartient à personne et son utilisation doit être répartie au mieux entre les différents usagers. La gestion administrative de ce bien commun par un ensemble d'institutions doit permettre de répondre aux besoins de tous les usagers mais également d'assurer la pérennité de la ressource. Depuis 50 ans l'organisation des différentes institutions s'occupant de la gestion de l'eau évolue pour atteindre au mieux cet objectif.

Dans ce chapitre, nous présenterons la complexité de l'organisation actuelle de la gestion de l'eau en France ainsi que les mutations qui ont eues cours ces dernières années. Les institutions et documents de planification ayant part dans la gestion qualitative et quantitative de l'eau seront présentés. La question de la protection des populations contre les inondations, qui peut être considérée comme une part importante de la gestion de l'eau en France, ne sera pas abordée. De même, les systèmes de gestion spécifiques s'appliquant aux zones littorales ne seront pas évoqués dans ce chapitre. Un nombre d'acronymes important étant utilisé dans la gestion administrative de l'eau, le glossaire situé au début de cette thèse (page [xxi](#)) peut servir d'aide à la lecture.

## A - I - 1 Rapide historique d'une organisation de l'eau territorialisée

En France, la gestion de l'eau par territoire est une forme d'organisation ancienne et complexe. Après la Révolution et la réorganisation du territoire français, le bassin hydrographique défini scientifiquement, s'invite comme potentiel pour un découpage administratif et politique du territoire. C'est suite à la loi de 1964 que la gestion de l'eau par bassin versant est institutionnalisée en France. Cette spécificité française à l'époque [[Charnay, 2010](#)] est la première des étapes de la décentralisation des politiques de l'eau qui a pour objectif de favoriser la démocratie locale et d'assurer l'efficacité sociale et économique de ces politiques [Ghiotti \[2006\]](#). La gestion par bassin versant introduit le principe de *pollueur-payeur*, puis de *préleveur-payeur* qui s'impose comme le système de gestion financière de l'eau. Le modèle français avant-gardiste dans ce domaine [[Ghiotti, 2006](#)] , [[Charnay, 2010](#)] se généralise en Europe et est adopté au niveau de l'Union Européenne par la Directive Cadre sur l'Eau en 2000.

A partir des années 1990, les politiques de l'eau en France deviennent de moins en moins sectorielles pour mieux prendre en compte l'approche milieu et systémique de l'eau. L'approche sectorisée de l'eau entre les différents usages agriculture, tourisme, eau potable, etc. est remise en cause du fait de l'augmentation des besoins. La loi sur l'eau de 1992 instaure les SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) et les SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) afin d'inscrire les politiques de l'eau dans des projets de développements territoriaux. L'eau est considérée comme un élément fédérateur entre les différentes politiques sectorielles et la décentralisation souhaite créer un espace où s'organise l'ensemble des réflexions et des concertations [Charnay \[2010\]](#). C'est ainsi qu'est née l'appellation de *gestion intégrée* qui se caractérise par cette absence de sectorisation pour une prise en compte globale de l'élément eau considéré comme un patrimoine commun. Elle oblige tous les acteurs de l'eau à négocier malgré des intérêts parfois opposés et à partager les coûts de la consommation d'eau.

## A - I - 2 L'organisation administrative actuelle

### I - 2 - a Les trois grands principes

La gestion de l'eau en France repose sur plusieurs grands principes fédérant l'organisation administrative de cette gestion. Le premier principe énonçant que *l'eau fait partie du patrimoine commun de la nation*, introduit la volonté d'une gestion de l'eau intégrée, c'est à dire prenant

en compte de manière transversale tous les secteurs et milieux ayant besoin d'eau. Cette gestion intégrée se fait en premier lieu à l'échelle d'un bassin versant. Le deuxième principe repose sur le fait que *l'eau appartient à tous* et que chaque personne a le droit d'accéder à l'eau potable dans des conditions économiques acceptables par tous. Ce principe établit l'obligation de fournir une eau de qualité et en quantité suffisante pour chaque citoyen. Cette responsabilité repose souvent sur les collectivités locales (distribution d'eau potable et collecte des eaux usées). Enfin le troisième principe gouvernant la gestion de l'eau en France repose sur l'application du principe *pollueur-payeur* et *préleveur-payeur* appelé également *l'eau paie l'eau*. Ainsi, le système de redevances et de taxes sur l'eau permet de financer les aménagements nécessaires tant en matière environnementale qu'économique pour maintenir une ressource en eau suffisante et de qualité.

Le respect de ces trois principes simples implique paradoxalement une organisation complexe. Complexe dans un premier lieu par la diversité des acteurs engagés activement dans la gestion de l'eau. Du fait que l'eau appartienne à tous, chacun a donc le droit de représenter ses intérêts lors de décisions sur cette gestion. Ainsi, la gestion de l'eau en France est partenariale et concertée car impliquant un grand nombre d'acteurs sans prédominance. Les pouvoirs publics, collectivités territoriales (et leurs groupements), acteurs économiques, associations diverses, etc. sont donc conviés à une même table pour trouver le meilleur compromis possible. Complexe ensuite de par son imbrication d'échelles spatiales d'application et de décision. Ainsi le cadre européen, le cadre national, le cadre régional et départemental et enfin les communes et leurs regroupements ont tous un rôle majeur dans la gestion de l'eau française. Multiplicité d'acteurs et multiplicité d'échelles induisent une forte complexité. Dans la section suivante, les principaux outils de gestion de l'eau en France seront présentés. Cette section s'appuie, entres autres documents, sur le rapport de [Levrault \[2013\]](#) ayant évalué la politique de l'eau française et sur le document de [OIEAU \[2009\]](#).

## I - 2 - b Le niveau européen et national

En matière d'environnement, 80% de la réglementation nationale est d'origine communautaire, c'est à dire découlant de décisions prises à la majorité du Parlement Européen [[Levrault, 2013](#)]. Pour la gestion de l'eau, c'est la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) adoptée en 2000 qui instaure un certain nombre de règles, d'objectifs et un calendrier traduit au niveau national de chaque Etat Membre permettant une cohérence et une harmonisation des méthodes de travail des nations. La DCE impose l'objectif d'atteindre un bon état général pour toutes les eaux (superficielles, souterraines et côtières) avec une obligation de résultats d'ici 2015.

Au niveau national français, c'est le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE<sup>1</sup>) qui coordonne la gestion de l'eau. Sa direction de l'eau et de la biodiversité

---

1. ce ministère a pris de nombreux noms différents depuis sa création : Ministère de l'Environnement (1971) ; Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable MEDD (mai-2002) ; Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire MEDAD (mai-2007) ; Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire MEEDDAT (mars-2008) ; Ministère de l'Ecologie, de l'Energie du Développement Durable et de la Mer MEEDDM (juin-2009), Ministère de l'Ecologie, des Transports et du Logement MEDDTL (novembre-2010) ; Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie MEDDE (mai-2012). Dans cette thèse nous évoquerons ce ministère par son sigle actuel (MEDDE). Néanmoins, lorsque des publications émanant du ministère sont citées, le nom de ce dernier au moment de la publication est utilisé.

(DEB) est en charge d'élaborer, d'animer et d'évaluer la politique nationale de l'eau et des milieux aquatiques en cohérence avec les directives européennes. D'autres ministères sont également engagés dans la gestion de l'eau tels que le ministère de l'agriculture (notamment pour les questions d'irrigation et de réservoirs de stockage), le ministère de l'industrie ou celui de la santé (pour la protection des populations notamment en matière de qualité d'eau). Ces ministères sont tous coordonnés au sein de la Mission Interministerielle de l'Eau (MIE) dont le secrétariat est assuré par le MEDDE.

L'aspect participatif et partenarial de la gestion de l'eau au niveau national est représenté par le Conseil National de l'Eau (CNE) qui est une agence consultative donnant son avis sur les projets de textes juridiques, les projets de réformes et les projets de plans d'action gouvernementaux en matière d'eau. Il peut également proposer des avis sur le prix de l'eau et sur la qualité des services publics de l'eau et de l'assainissement [[OIEAU, 2009](#)].

L'Office National de l'Eau et des milieux Aquatiques (ONEMA) est un organisme national responsable de la connaissance et de la surveillance de l'état des eaux et des milieux aquatiques. Il a de nombreuses missions dont la plus connue est celle de police de l'eau. Il doit également répondre aux missions de connaissance et d'expertise des hydrosystèmes (programmes de recherches), de mise à disposition de l'information et des données sur les ressources en eau (pilotage du Système national d'Information sur l'Eau : SIE) et une mission d'action territoriale avec un appui à la mise en oeuvre des politiques publiques, un diagnostic de l'état des eaux et des milieux aquatiques et également un appui technique. L'ONEMA est organisé sur trois échelons territoriaux : une direction générale au niveau national, 9 délégations interrégionales et 101 délégations départementales.

## I - 2 - c Le niveau du grand bassin hydrographique

La DCE instaure une échelle géographique de gestion : les districts hydrographiques, plus communément appelés grands bassins hydrographiques. La directive européenne s'est largement inspirée sur ce point du modèle français en place depuis 50 ans (*cf.* section [A - I - 2](#)). Ainsi, les districts hydrographiques français sont-ils équivalents (à quelques aménagements près afin de prendre en compte les districts internationaux) aux 7 grands bassins hydrologiques définis dans la loi de 1964 auxquels il faut ajouter 5 bassins d'outre-mer ou ultramarins (figure [A.1](#)).

Les grands bassins hydrographiques constituent l'échelle principale de planification des politiques de l'eau. C'est à cette échelle que sont élaborés les SDAGE (Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux). Le SDAGE est un document de planification élaboré pour 6 ans. Il fixe les orientations générales de la gestion équilibrée de la ressource en eau et les objectifs à atteindre en lien avec la DCE. Le SDAGE possède un Programme de Mesures (PDM) déclinant les moyens ainsi que les actions permettant d'atteindre les objectifs fixés. Les mesures sont des actions concrètes assorties d'un échéancier et d'une évaluation financière. Elles peuvent être de nature réglementaire, économique, fiscale, contractuelle, etc.<sup>2</sup> Le Programme de Mesures engage l'Etat sur des mesures prioritaires vis-à-vis de la DCE.

---

2. [http ://www.eaufrance.fr](http://www.eaufrance.fr)

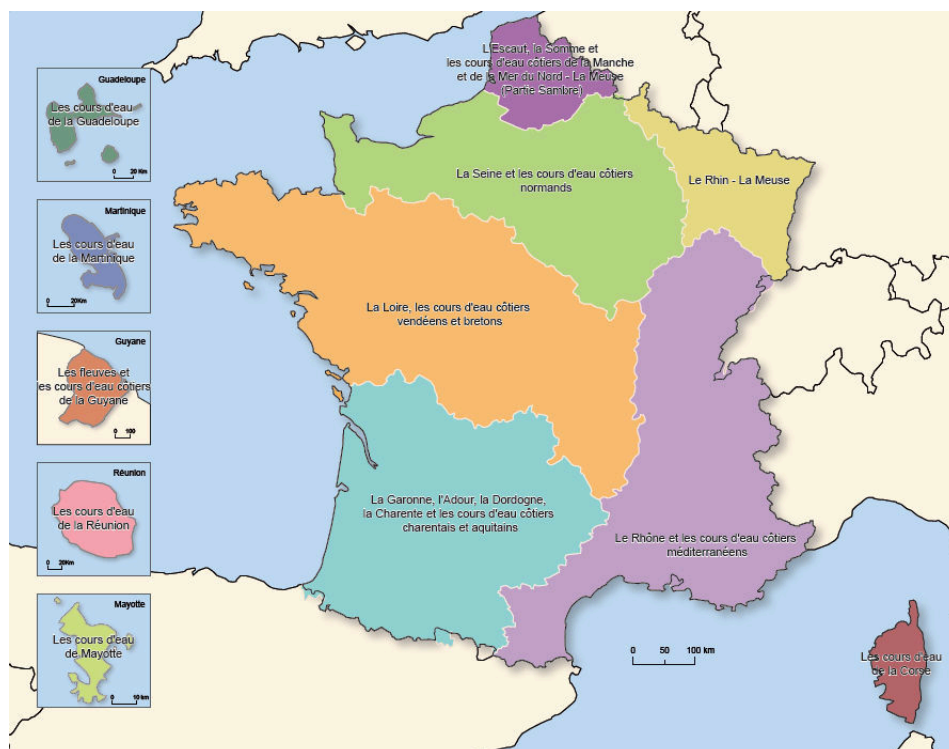


Figure A.1 – Les 7 grands bassins hydrographiques et 5 bassins ultramarins français. *Source :* [http ://www.eaufrance.fr](http://www.eaufrance.fr)

Le SDAGE, véritable outil de planification de la gestion de l'eau, est élaboré par le Comité de Bassin. Communément appelé le Parlement de l'Eau, cette institution centrale regroupe les acteurs privés et publics de l'eau. Il est composé de 40% de représentants des collectivités du bassin, de 40% de représentants des usagers et des associations socio-professionnelles (industriels, agriculteurs, etc.) et de 20% de représentants de l'Etat et de ses établissements publics. Tous les acteurs et usagers de l'eau sont représentés dans le Comité de Bassin qui doit être un lieu de débat afin de définir de façon concertée les grands axes de la politique de l'eau sur le grand bassin hydrographique. Le Comité donne également son avis sur le taux de redevances et le PDM sur lequel s'est engagé l'Etat [Levrault, 2013].

Chaque grand bassin hydrologique possède une agence de l'eau. Ces établissements publics de l'Etat ont essentiellement un caractère administratif de gestion. Elles ont des compétences financières telles que l'attribution de subventions, la perception de redevances, la contractualisation d'emprunts, etc. Ce sont les redevances perçues par les agences de l'eau qui financent le PDM. L'agence de l'eau est dirigée par un comité d'administration composé essentiellement des différents groupes du Comité de Bassin et dont le président ainsi que le directeur de l'agence sont nommés par le Gouvernement.

C'est au niveau des redevances pour l'agence de l'eau que le principe *l'eau paie l'eau* (cf. page 9) s'applique. L'agence de l'eau prélève au total 7 types de taxes différentes en fonction de la pression exercée par l'utilisateur sur la ressource en eau (pollution, modernisation des réseaux de collecte d'eaux usées, pollutions agricoles diffuses, prélèvement de la ressource, stockage d'eau

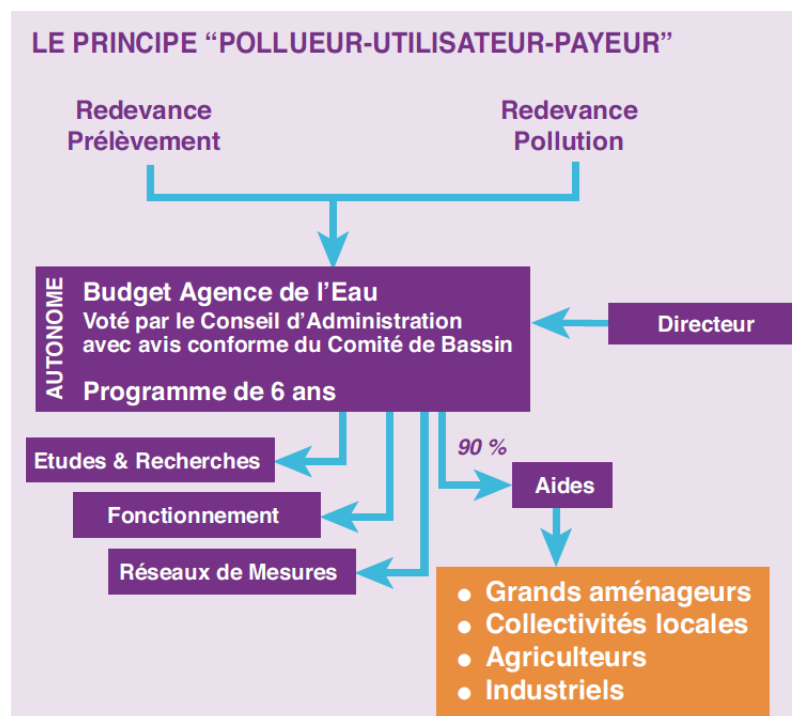


Figure A.2 – Système de prélèvements et de redistribution des redevances de l'Agence de l'Eau sur le principe *pollueur-payeur* et *préleveur-payeur*. Source : [OIEAU \[2009\]](#).

en période d'été, obstacle sur les cours d'eau et enfin redevance pour la protection du milieu aquatique). L'objectif de ces redevances est d'inciter les usagers à limiter leurs consommations et les rejets polluants dans la ressource en eau. Ces redevances sont par la suite redistribuées pour soutenir la recherche et les investissements dans le domaine de l'eau (figure A.2). Un Programme d'Intervention de l'Agence de l'Eau est établi pour 6 ans pour déterminer les priorités de financements en fonction des besoins du grand bassin hydrographique [[OIEAU, 2009](#)].

Dans les départements d'outre-mer, il n'y a pas d'agence de l'eau mais des offices de l'eau qui diffèrent quelque peu de l'organisation des agences. Pour plus de détails sur ce point, les annexes du rapport de [Levrault \[2013\]](#) peuvent être consultées.

Le préfet coordinateur de bassin représente l'Etat dans le processus de décision au niveau des grands bassins hydrographiques. Il est l'autorité compétente vis-à-vis de l'Union européenne. Son rôle est d'animer et de coordonner l'action des Préfets et des services de l'Etat sur le bassin. Plus précisément, il doit approuver le SDAGE élaboré par le Comité de Bassin et arrêter le PDM associé ainsi que présenter au Comité de Bassin une synthèse de la mise en œuvre de ce programme. Le préfet coordinateur de bassin a aussi un rôle important en matière de protection de la ressource en eau. Il a la possibilité de prendre des arrêtés pour coordonner l'action de plusieurs départements lors de situations de crises comme des pénuries d'eau par exemple. Du point de vue des pollutions agricoles, il fixe les délimitations des zones vulnérables et sensibles. Enfin, il anime et coordonne la politique de l'Etat en matière de prévention des inondations.

Pour les actions d'animations et de coordination, le préfet coordinateur de bassin s'appuie sur

la DREAL déléguée de bassin.

#### I - 2 - d Le niveau départemental et local : mise en œuvre opérationnelle

Le niveau départemental est le niveau opérationnel de la politique de l'eau. Le préfet de département anime et coordonne la politique de l'eau. Pour ce faire il s'appuie sur les services déconcentrés de l'Etat qui déclinent au niveau départemental la planification élaborée au niveau du bassin hydrographique. Les services déconcentrés les plus notables pour la gestion de l'eau sont :

- les directions départementales des territoires (DDT) qui mettent en œuvre certaines actions de police de l'eau notamment les autorisations administratives et des contrôles
- les directions de la protection des populations (DDPP) qui ont pour rôle d'inspecter certaines installations du point de vue de la qualité de l'eau
- les DREAL qui sont le dernier niveau de représentation du MEDDE
- les délégations territoriales de l'Agence Régionale de Santé (ARS) pour la politique et la police sanitaire

L'ensemble des services déconcentrés de l'Etat sont réunis au sein d'une Mission Inter-Services de l'Eau et de la Nature (MISEN) qui, sous l'autorité du préfet, coordonne les différentes institutions publiques. La MISEN regroupe des représentants de l'agence de l'eau compétente, des représentants de l'ARS, des représentants de la DREAL, des DDT, des représentants de l'ONEMA, de la gendarmerie et le cas échéant, les parcs nationaux, le représentant départemental des réserves naturelles et si besoin des représentants de collectivités, des associations environnementales, d'usagers, etc. L'objectif de ce guichet unique de l'eau pour les compétences de l'Etat est de permettre à des administrations départementales s'occupant de différents secteurs mais ayant un rôle dans la gestion de l'eau de pouvoir travailler ensemble pour éviter les logiques sectorielles. C'est un organe découlant pleinement de la volonté d'une gestion intégrée de l'eau.

Cette Mission Inter-Services a pour rôle d'élaborer un plan d'action stratégique pour le département. Elle doit fixer les objectifs prioritaires, notamment dans le cadre de la DCE, en déclinant localement les stratégies nationales et régionales. Ces réflexions aboutissent à la définition d'un Plan d'Action Opérationnel Territorial (PAOT). Ce plan articule les règles de droit (réglementation territoriale, plans de contrôles inter-services) avec les modalités de financement et de gouvernance. Il est la déclinaison du PDM des SDAGE [[Levrault, 2013](#)].

La MISEN coordonne également les polices de l'eau et veille à l'intégration des enjeux de l'eau et de la biodiversité dans les autres politiques sectorielles.

Outre l'Etat, les collectivités locales ont un rôle majeur dans la mise en œuvre des politiques de gestion de l'eau au niveau local. Les Régions et Départements n'ont pas de compétences obligatoires relevant de la gestion de l'eau mais interviennent souvent par le biais de financements et d'aide technique aux communes et intercommunalités. Ainsi au cadre légal présenté ici s'ajoute des pratiques locales de gouvernance de l'eau.



Les communes ont quant à elles une responsabilité vis-à-vis de la distribution d'eau potable ainsi que de la collecte et du traitement des eaux usées. Le maire dispose de pouvoirs de police générale qui lui permettent de prendre des décisions dans le domaine de l'eau. Le choix du mode de gestion de l'eau peut être celui de régie ou confié à une entreprise privée par délégation de services publics.

Les communes peuvent choisir de s'organiser en structures locales plus importantes pour mutualiser les coûts liés à la gestion de l'eau. Ainsi des syndicats intercommunaux, des syndicats mixtes, etc. voient le jour. Dans ce cas, ces structures animent et mettent en oeuvre les politiques de gestion de l'eau sur le territoire qu'elles couvrent. Parfois ces structures se déclarent en Établissement Public Territorial de Bassin (EPTB) ce qui permet à cette entité d'être l'interlocuteur privilégié vis-à-vis des autres collectivités et groupements. L'EPTB est également consulté lors de la réalisation des SDAGE et sur les projets dans le domaine de l'eau dépassant un certain montant. Ainsi il permet une représentation du niveau local à l'échelle du bassin hydrographique. Actuellement, plus de la moitié du territoire national est couvert par des EPTB.

Les EPTB ont la possibilité de mener à bien des SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) ou des contrats de milieux (contrats de rivières, contrat de nappe, etc.). Le SAGE est une déclinaison locale du SDAGE sur une unité hydrographique et socio-économique cohérente. Tout comme lui, il a une valeur d'opposition et une fois approuvé l'ensemble des autorités administratives dans le périmètre concerné doivent être en adéquation avec le SAGE (Plan Local d'Urbanisme, Schéma de Cohérence Territoriale, etc.). La création du SAGE fonctionne de manière similaire à celui du SDAGE. Une Commission Locale de l'Eau (CLE) est créée pour coordonner les différents acteurs (collectivités territoriales, usagers et Etat principalement) et assurer une gestion concertée. Cette CLE peut s'appuyer sur un EPTB ou toute autre structure de groupement telle que les intercommunalités, syndicats mixtes, etc. Le SAGE fixe ensuite des objectifs à atteindre en matière de qualité et quantité des ressources en eau, usages de l'eau, préservation des écosystèmes, etc. et prévoit des actions pour atteindre ces objectifs. Actuellement 51% du territoire français est couvert par des SAGE. Ce qui représente 178 SAGE en cours d'élaboration ou déjà adoptés.

Les contrats de milieux fonctionnent de manière similaire en réunissant l'ensemble des acteurs de l'eau du milieu dans un comité de rivière, s'il s'agit d'un contrat de rivière par exemple, pour fixer des objectifs et des actions. A la différence du SAGE les contrats de milieux ne sont pas opposables et n'ont donc pas de portée juridique. Néanmoins ils constituent un engagement contractuel de tous leurs signataires pour la préservation de la ressource.

D'autres acteurs sont amenés à intervenir et à participer activement à la gestion de l'eau au niveau local. Il s'agit notamment des acteurs économiques (industriels et agriculteurs) qui via leurs établissements publics (chambre de commerce et d'industrie, chambre d'agriculture) prennent part à la planification territoriale de l'eau. Les acteurs associatifs sont également très présents notamment via les associations de protection de l'environnement, les associations de sports nautiques, les associations de consommateurs et les fédérations de pêche.

Deux autres institutions de l'Etat, le Conseil Départemental de l'Environnement et des Risques Sanitaires et Technologiques, consulté pour les demandes d'autorisation de prélèvements ainsi

que le Parquet via son procureur de la République en charge de la police judiciaire, et donc de la politique pénale dans le domaine de l'eau, sont également intégrées dans des coopérations pour la gestion de l'eau au niveau local. Pour plus de détails sur ces acteurs, les annexes du rapport [Levrault \[2013\]](#) sont conseillées.

## A - II Une organisation administrative en mutation

### A - II - 1 Vers une déconcentration et une décentralisation

Depuis la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA) de 2006 rénovant l'ensemble de la politique de l'eau française afin de se donner les moyens d'atteindre les objectifs de la DCE, l'organisation administrative de la gestion de l'eau a évolué rapidement. L'organisation actuelle se base sur la déconcentration (l'Etat est présent à travers ses institutions déconcentrées à différents échelons tel que l'ONEMA) et la décentralisation (l'Etat transfère certaines compétences aux communes, départements et régions à la fois juridiquement et financièrement). La création de l'ONEMA en 2006 a entraîné une redistribution des rôles au niveau central avec un transfert de certaines missions. Lors de sa création des craintes avaient été soulevées quant au risque de démembrement des fonctions de pilotage de la politique de l'eau due à cette nouvelle institution [[Keller, 2007](#)]. Sept ans plus tard, le rapport de [Levrault \[2013\]](#) sur l'évaluation de la politique de l'eau s'interroge sur le devenir de l'ONEMA qui durant ses premières années d'existence a montré de nombreuses défaillances dans la gestion administrative et financière de l'établissement. Entre autres choses, la Cour des comptes estime qu'il y a une mauvaise coordination de la police de l'eau avec les services de l'Etat, pourtant une des missions majeures de l'ONEMA. Un projet de création d'une nouvelle agence française de la biodiversité envisage d'englober l'ONEMA et d'élargir certaines missions des agences de l'eau dans son format futur. Une telle réorganisation pourra entraîner une modification des missions spécifiques de l'ONEMA.

La révision générale des politiques publiques de 2007 a également engendré une modification importante des délégations départementales. Les DIREN, DRIRE, DDRAF, DDEA, DDASS ont été modifiées et fusionnées pour laisser place au DREAL, DRAAF, ARS, DDT et DDCSPP. Cette évolution rapide en quelques années entraîne de la confusion et de la complexité parmi les différents acteurs de l'eau.

D'autres projets de loi comme celui sur la décentralisation ou les discussions au niveau européen sur une modification de la politique agricole commune ainsi que le *choc de simplification* voulu par le Gouvernement pourraient amener la politique de l'eau à changer de nouveau sensiblement au cours des prochaines années.

### A - II - 2 Une organisation en évolution engendrant des chevauchements de compétences

La décentralisation des politiques de l'eau avec la reconnaissance du Département, de la Commune et de la Région comme collectivités territoriales a ouvert le jeu d'acteurs de la politique de l'eau à d'autres partenaires qui deviennent plus importants [[Ghiotti, 2006](#)]. Elle a également

entraîné une multiplicité des centres de décisions et une diversité d'échelles d'interventions. Ces nouvelles modalités de gestion de l'eau entraînent des négociations entre tous les acteurs de l'eau qui sont multipliés, qui ont des intérêts parfois opposés et qui doivent partager les coûts et bénéfices de la planification territoriale de l'eau. De plus, cette décentralisation en plusieurs étapes engendre de nouvelles institutions et la refonte de certaines. Par manque de communication ou de moyens, ces évolutions engendrent des chevauchements de connaissances et un manque de lisibilité et de clarté dans le rôle de chaque acteur de l'eau. Ce problème est bien représenté par la figure A.3 qui tente de résumer la présentation réalisée précédemment des différents acteurs de l'eau et de leurs relations. Les organismes associatifs ont volontairement été laissés de côté pour permettre une lecture plus claire du schéma. Malgré cela, l'imbrication des échelles de décisions et la multiplicité des acteurs rendent la réalisation d'un schéma général complet et lisible quasiment impossible ainsi seule les principales interactions ont pu être représentées. Cette difficile lecture se retrouve pour chaque citoyen ou acteurs du territoire cherchant son cheminement dans l'organisation de l'eau en France.

Même si la répartition des rôles entre les services et les établissements publics de l'Etat est en théorie claire (cf. section A - I - 2 ), dans les faits, l'imbrication des compétences est réelle. Cela induit un manque de priorisation qui amène un sentiment de dispersion et un certain sentiment d'inefficacité des agents des services de l'Etat [Levrault, 2013].

La mise en place de nouvelles échelles d'intervention via le SAGE et les contrats de milieu permettent de mieux prendre en compte la réalité des territoires dans le domaine de l'eau. Ils instaurent aussi une nouvelle échelle de gestion, celle du bassin versant, cohérente de manière hydrologique mais qui n'a pas de pouvoir juridique ni de maîtrise d'ouvrage, ce qui peut limiter son action pourtant encouragée au niveau de l'Etat et de l'Europe [Charnay, 2010].

La lenteur de la mise en place effective de la politique de l'eau au niveau local est également un frein à une politique efficace. Le délai d'élaboration d'un SAGE est de 6 à 10 ans posant des questions quant au renouvellement des membres de la CLE en charge de le mettre en place. Ce long processus, contrepartie de la démocratie locale, constitue un handicap important pour la déclinaison des SDAGE à un niveau opérationnel. Pour une accélération de ces processus, il est nécessaire que tous les différents acteurs concernés par la gestion de l'eau reconnaissent premièrement l'existence d'un problème. L'expérience montre que la reconnaissance du problème est souvent favorisée par l'occurrence d'une crise ou d'une situation conflictuelle, rendant difficile l'anticipation de ces dernières. Il est donc essentiel de développer des moyens de présenter la situation de manière à recueillir l'adhésion de chacun sur l'existence d'un problème latent, avant l'apparition de situations de crises. Par la suite, l'ensemble des acteurs doit parvenir à partager un diagnostic commun de la situation et des enjeux qui en découlent. Ces deux étapes sont essentielles afin de pouvoir définir les objectifs de la politique locale de l'eau et construire un plan d'action efficace mais sont cependant souvent négligées par les services de l'Etat [Levrault, 2013].

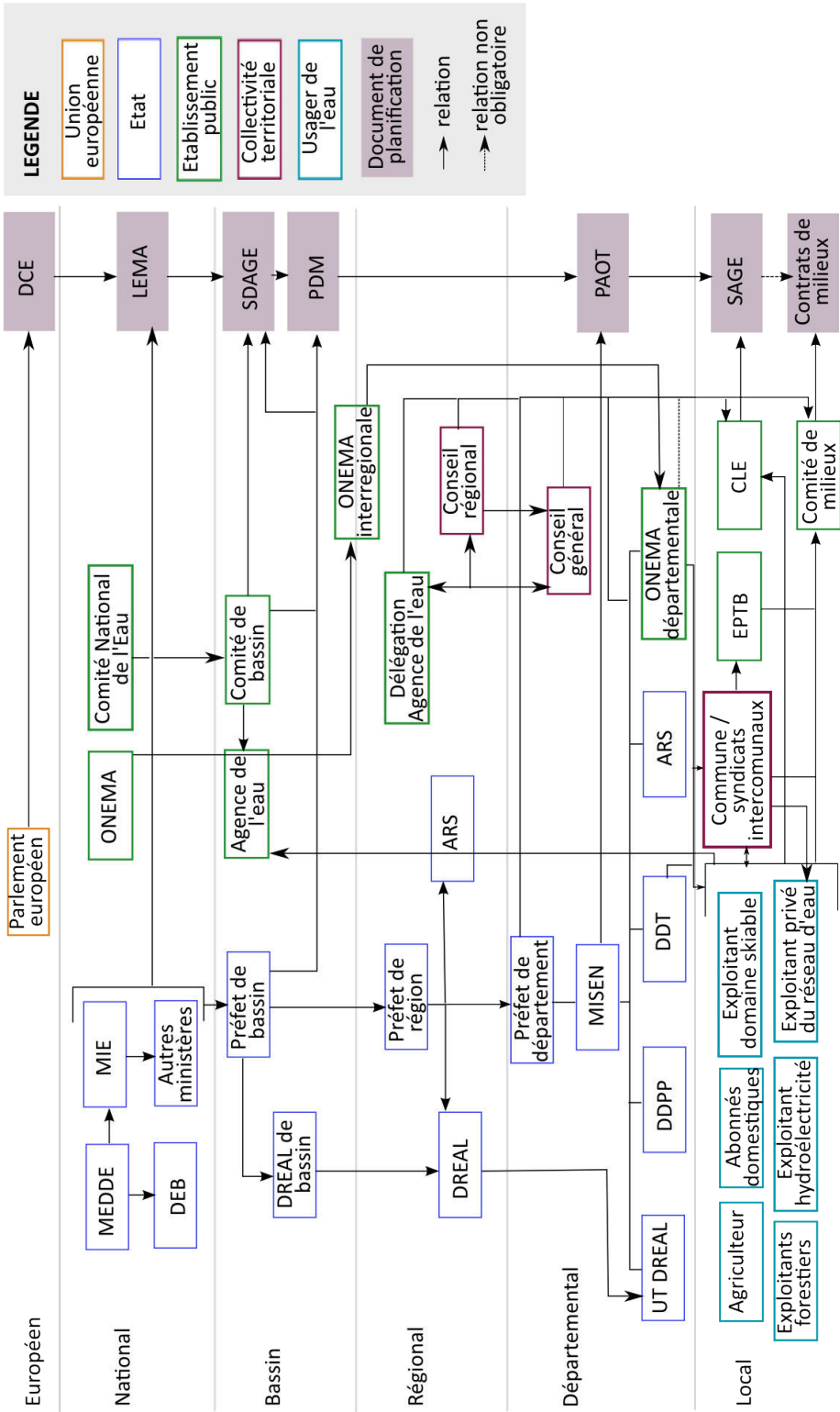


Figure A.3 – Récapitulatif des principaux acteurs de la gestion de l'eau en France (sauf associations) ainsi que les documents de planification principaux

## A - III Conclusion

Le système de gestion intégrée de l'eau en France permet une bonne prise en compte de tous les acteurs de l'eau aux différents échelons du territoire. La participation de tous ces acteurs, essentielle pour une gestion concertée, entraîne néanmoins des négociations multiples engendrant une lenteur de mise en œuvre problématique.

La diversité des échelles d'actions, européenne, nationale, districts hydrographiques, régionale, départementale, intercommunale, bassin versant et enfin locale engendre un enchevêtrement des compétences et une complexité nuisant à la bonne mise en œuvre de la politique de l'eau en France. Les différentes étapes de la décentralisation ont transféré des compétences aux délégations départementales en refonte permettant une meilleure déclinaison de la planification décidée au niveau du bassin sur le territoire départemental. Cependant la refonte de ces délégations dans un souci de simplification engendre des modifications de structure ajoutant de la complexité à une organisation déjà difficile à percevoir pour le citoyen.

La prise en compte de l'adaptation au changement climatique, comme prévu par la LEMA de 2006 et renouvelée par le Grenelle de l'environnement en 2008, risque de complexifier encore la politique de l'eau en France. L'influence des changements climatiques sur les ressources en eau est développée dans le chapitre [B](#).

Dès lors il est vital entre autres nécessités de prévoir des réponses politiques à ces évolutions climatiques. L'atténuation et l'adaptation aux changements climatiques sont les deux axes développés pour répondre à ces nouveaux défis. Le chapitre [C](#) développe la mise en place de ces politiques.

A travers cette complexité, nous nous sommes interrogés sur la manière de contribuer à la gestion intégrée des ressources en eau. D'un point de vue scientifique, le développement d'un outil innovant permettant de représenter les ressources en eau et leurs évolutions en fonction des scénarios climatiques et des activités socio-économiques ainsi que l'impact des plans de développement territoriaux doit permettre d'appréhender plus efficacement les questions de gestion intégrée au niveau local. Le développement de ce modèle couplé est détaillé dans la [Deuxième partie](#). L'accessibilité des résultats de ce développement scientifique et son utilisation par les acteurs du territoire sont essentielles. En effet cela pourrait servir à expliciter la problématique de la gestion de l'eau dans sa globalité à l'ensemble des acteurs du territoire et à promouvoir ainsi l'adhésion au développement d'outil de planification cohérents et pertinents dans une optique de gestion durable des ressources. L'analyse de la structure administrative de la gestion de l'eau française effectuée dans ce chapitre atteste de la difficulté de trouver un interlocuteur pour diffuser les résultats. Il y a une multiplicité d'acteurs pertinents pour utiliser le modèle développé agissant à des échelles multiples. Aussi nous nous sommes donc orientés vers de nouvelles stratégies comme le développement d'interfaces ludiques permettant à tous les acteurs et interlocuteurs de l'eau d'accéder et d'expérimenter les connaissances développées. Cette stratégie est présentée dans la [Troisième partie](#).

## CHAPITRE B

---

### Un climat en évolution

---

Le contexte climatique détermine la quantité d'eau disponible sur un territoire. Ainsi les températures et les précipitations conditionnent principalement la disponibilité des ressources en eau. Le climat des Alpes est en évolution depuis un certain nombre d'années. Des augmentations de températures sont constatées sur l'ensemble de l'arc alpin. Cette évolution a un fort impact sur la quantité d'eau disponible pour les différentes activités économiques de la région. La gestion de l'eau, déjà complexe administrativement (*cf.* chapitre A), s'en retrouve complexifiée d'avantage et doit prendre en compte ces paramètres afin d'anticiper des crises de pénuries d'eau par exemple.

Dans ce chapitre, nous présenterons les effets constatés des évolutions climatiques sur les températures et les précipitations dans les Alpes ainsi que leurs impacts sur les hydrosystèmes alpins. Nous conclurons sur les impacts de ces changements sur la gestion de l'eau actuelle et future dans les Alpes.

#### B - I Les effets du changement climatique constatés

Plusieurs paramètres entrent dans la composition du climat, cependant dans cette section, nous nous intéresserons aux deux principaux influençant majoritairement la quantité d'eau sur un territoire : les températures et les précipitations.

## B - I - 1 Évolutions récentes des températures dans les Alpes

Si les causes du réchauffement climatique font encore parfois débats, il est admis que les températures moyennes terrestres ont augmenté ces dernières décennies. Le GIEC dans son rapport de 2013 [[IPCC, 2013](#)], estime que la température moyenne du globe a augmenté de  $+0.89^{\circ}\text{C}$  entre 1901 et 2012 avec une marge d'erreur de  $0.19^{\circ}\text{C}$ . La tendance au réchauffement est mondiale. Les trois dernières décennies ont toutes été plus chaudes que toutes les décennies précédentes depuis 1880 et celle des années 2000 a été la plus chaude enregistrée. Cette augmentation des températures moyennes de surface est plus importante sur les régions européennes et en particulier au Sud-Ouest, Nord-Est et dans les régions montagneuses de l'Europe [[EEA, 2009](#)].

Cette particularité fait des Alpes un territoire particulièrement sensible au réchauffement climatique. [Auer et al. \[2007\]](#) dans leur étude reprennent et homogénéisent des séries de données climatiques dans les Alpes remontant à 1767 pour les températures et les pressions atmosphériques et 1800 pour les précipitations. En analysant ces séries de données homogénéisées, ils mettent en évidence le réchauffement accru des Alpes : la région alpine s'est réchauffée à un rythme deux fois plus important que l'hémisphère nord dans sa globalité depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle comme le montre la figure B.1. Le réchauffement plus intense de la région alpine par rapport au reste de l'Europe est constaté dans de nombreuses études [[ONERC, 2008](#)], [[Bigot et Rome, 2010](#)] [[Durand et al., 2009a](#)]. Cette évolution des températures s'est faite en deux temps, un premier palier a été franchi en 1950, puis il y a eu une accélération du phénomène à partir de 1970 où les températures se réchauffent de  $+1.3^{\circ}\text{C}$  tous les 25 ans.

Les zones montagneuses et en particulier européennes sont donc plus touchées que d'autres parties du globe par le réchauffement climatique. Y-a-t-il également une différence de réchauffement entre les plaines alpines et les hautes altitudes ? Sur ce point, la communauté scientifique apporte différentes réponses. [Beniston et al. \[1997\]](#) étudient les Alpes suisses et mettent en évidence une forte relation entre l'altitude et la vitesse du réchauffement climatique, les hautes altitudes étant plus sensibles au réchauffement que les zones de plaine. Ils pointent néanmoins l'importance des incertitudes et la difficulté liée au manque de données en zone montagneuse. En opposition aux résultats suisses, [Auer et al. \[2007\]](#) dans leur analyse du climat alpin montrent une homogénéité de réchauffement entre les plaines et les hautes altitudes des Alpes.

Ces différences de tendance très marquées peuvent s'expliquer par la complexité du climat montagnard engendrée par de multiples facteurs comme la topographie, l'exposition, la pente, la couverture de glace et de neige, etc. Des effets très locaux peuvent donc se produire avec des changements rapides et conséquents de températures et précipitations sur des courtes distances dans les climats montagnards [[Beniston, 2006](#)]. [Pepin et Lundquist \[2008\]](#) font une étude comparative sur plus de 1000 stations météorologiques comprises entre 500 et 4700 m d'altitude à travers le globe. L'objectif est de dégager des tendances, ou non, en fonction de l'altitude des sites afin de déterminer si ce paramètre revêt une importance dans la vitesse de réchauffement accrue des zones montagneuses. Les résultats ne montrent pas de relation systématique entre l'altitude et la sensibilité au réchauffement climatique. Néanmoins, les zones proches de l'isotherme  $0^{\circ}\text{C}$  ressortent comme plus exposées aux évolutions de températures. La perte de couverture neigeuse ou glacière du fait de l'augmentation des températures diminue l'albédo et

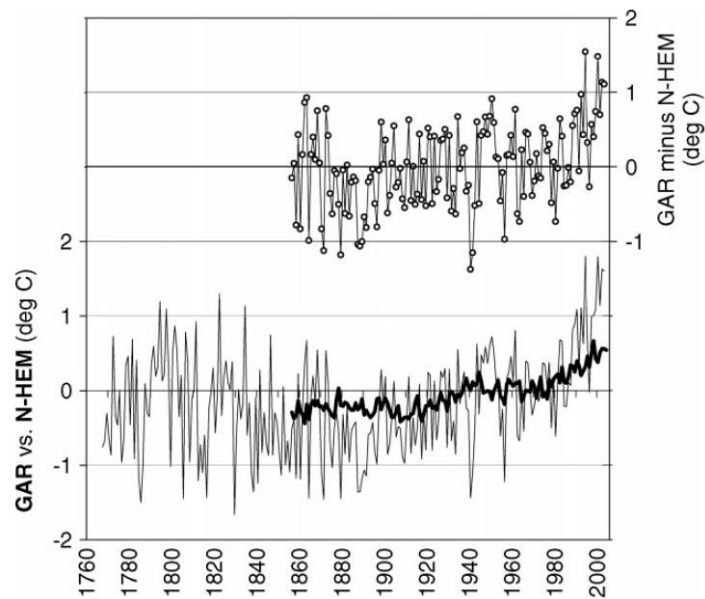


Figure B.1 – Températures homogénéisées (en bas) de la grande région alpine (GAR) de 1767 à 2003 (en gris) et températures moyennes de l’hémisphère Nord (N-HEM) de 1856 à 2003 (en gras) ; en haut : différences entre les anomalies de températures de la GAR par rapport à la moyenne de la période 1901-2000 avec les anomalies de températures de N-HEM pour la même période. *Source* : [Auer et al. \[2007\]](#)

augmente la proportion de radiations solaires absorbées par la surface terrestre provoquant une augmentation des températures de surfaces de ces zones. Le réchauffement est d’autant plus fort pour les zones plates de cette frange altitudinale proche de l’isotherme 0°C car l’effet d’absorption est plus important.

Du point de vue de la saisonnalité du réchauffement des Alpes, l’été semble être plus touché que les autres saisons [[Beniston, 2006](#)], [[EEA, 2009](#)], [[Durand et al., 2009a](#)]. Néanmoins la variabilité climatique est plus importante en hiver. Dans les alpes du sud, l’été et l’hiver sont touchés pareillement par le réchauffement. [Durand et al. \[2009b\]](#) et [Bigot et Rome \[2010\]](#) notent que la saison hivernale dans les Alpes enregistre moins d’évènements très froids et commence plus tard pour finir plus tôt. L’hiver devient donc plus tardif et le printemps plus précoce. Une diminution du nombre de jours de gel est alors enregistrée.

En conclusion, les températures dans les Alpes ces dernières décennies ont augmenté plus rapidement que sur le reste de l’Hémisphère Nord. Cette augmentation des températures entraîne une boucle de rétroaction positive pour le réchauffement, la perte de surfaces neigeuses et englacées augmentant le réchauffement des terres. Le réchauffement est plus intense en été mais a une variabilité plus forte en hiver.



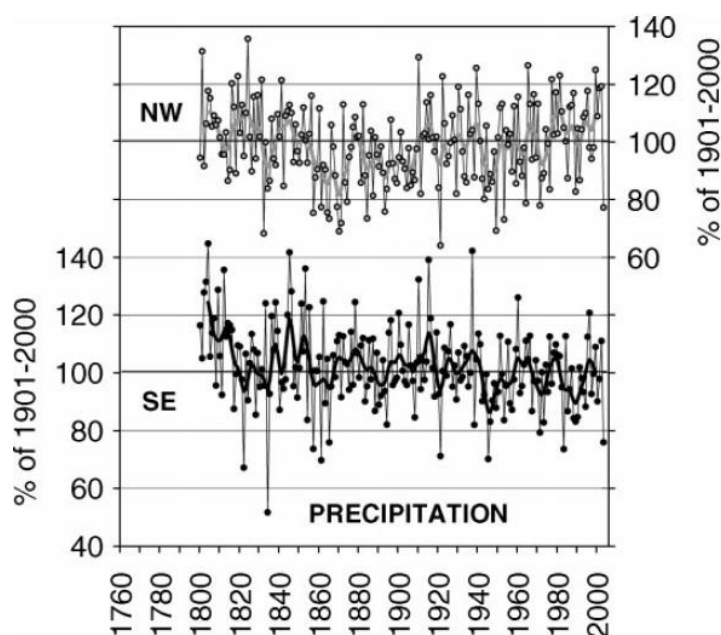


Figure B.2 – Évolution des précipitations de la région alpine de 1800 à 2007 en pourcentage des valeurs moyennes de la période 1901-2000. Source : [Auer et al. \[2007\]](#)

## B - I - 2 Évolutions récentes des précipitations dans les Alpes

Les évolutions récentes des précipitations sont moins probantes, que ce soit à l'échelle mondiale ou à l'échelle alpine. Les tendances observées sont souvent non significatives [[IPCC, 2013](#)], [[ONERC, 2008](#)]. Néanmoins, le GIEC estime que les précipitations ont augmenté dans la période 1900-2005 pour le nord de l'Europe tandis que la zone méditerranéenne a connu une diminution de ses apports en eau [[IPCC, 2007](#)]. Ces tendances se sont confirmées depuis 1951 [[IPCC, 2014a](#)]. Ces différences se retrouvent à l'échelle des Alpes avec des tendances opposées selon la localisation géographique. La figure B.2 présente les variations de précipitations sur les Alpes de 1800 à 2007 pour les zones nord-ouest et sud-est de l'arc alpin. On y observe l'augmentation des précipitations dans la zone nord-ouest des Alpes (en haut) depuis les années 1970 tandis que la zone sud-est (en bas) reçoit sur cette même période moins de précipitations que la moyenne du 20<sup>ème</sup> siècle.

D'un point de vue saisonnier, parmi les différents paramètres du climat étudiés par [Auer et al. \[2007\]](#) sur la région alpine, les précipitations est celui avec la plus grande variabilité spatiale, ne permettant pas une généralisation des tendances. L'étude montre néanmoins une tendance à des hivers plus secs ces dernières années. Parallèlement, [Begert et al. \[2005\]](#) qui ont mené un travail d'homogénéisation des températures et précipitations en Suisse sur la période 1864-2000 trouvent un résultat opposé avec des tendances significatives uniquement pour l'hiver où une augmentation des précipitations est constatée.

Plusieurs phénomènes peuvent expliquer ces contradictions. Tout d'abord, la forte spatialisation des précipitations en montagne en fonction de critères orographiques notamment (pentes, altitude, exposition, etc.), induit des différences marquées entre zones d'études. Outre cette

caractéristique, la grande difficulté à mesurer les précipitations en montagne engendre des incertitudes. En effet il y a peu de capteurs en altitude et les mesures des précipitations effectuées sont souvent difficiles notamment dues aux conditions climatiques (vent, neige) [Gottardi et al., 2012], [Gottardi et al., 2008]. Pourtant ces mesures en altitudes sont essentielles. Bien que ne représentant pas en pourcentage une grande étendue des Alpes, les zones de hautes altitudes sont celles recevant la majorité des précipitations solides (neige) qui ont une importance majeure dans les régimes hydrologiques de montagne [Saulnier et al., 2011a]. Il faut donc toujours utiliser avec précautions les données de précipitations en zones montagneuses. Ces incertitudes ainsi que la robustesse des tendances bien plus faibles que pour les tendances des températures peuvent expliquer les différences de résultats constatées entre les études.

Il ressort de cette analyse que le signal climatique des précipitations sur les Alpes est beaucoup plus difficile à saisir et à interpréter que pour les températures. On notera néanmoins un point d'accord sur une légère augmentation des précipitations sur le nord-ouest de l'arc alpin et une diminution plus forte de celles-ci dans la zone sud-est durant les dernières décennies [OFEV, 2012].

### B - I - 3 Évolutions récentes du manteau neigeux dans les Alpes

Si les évolutions de précipitations sont moins probantes, il existe quelques évidences de l'évolution des quantités de neiges. Par exemple, une plus courte saison de chutes de neige est observée sur une grande partie de l'hémisphère Nord [Takala et al., 2009] avec une saison de fonte démarant plus tôt [Scherrer et al., 2013], [Durand et al., 2009b].

La hauteur de neige dans les Alpes évolue significativement depuis plusieurs décennies. Il existe peu d'enregistrements sur le long-terme des hauteurs de neige au sol. Dans les Alpes françaises, le Centre d'Etudes de la Neige possède un enregistrement de cette donnée au niveau du col de Porte en Chartreuse à 1320 m d'altitude. La figure B.3 montre bien à la fois la variabilité inter-annuelle de la hauteur de neige et la tendance à la baisse de ces hauteurs. Durant la dernière décennie, une hauteur de neige dépassant 1,5 m a été enregistrée 1 fois contre 3 ou 4 fois pour les décennies précédentes [Etchevers et Martin, 2002]. Depuis 1960, Martin et Etchevers [2005] estiment qu'en moyenne 0.6 jours avec de la neige au sol sont perdus chaque année témoignant du potentiel impact du réchauffement climatique. Cette perte est une perte moyenne c'est à dire sur toute la longueur des 40 années de la série.

La forte variabilité inter-annuelle des quantités fait que d'un hiver à l'autre la hauteur de neige et le nombre de jours de neige peuvent grandement varier. Cette caractéristique fait également qu'il est parfois difficile de communiquer sur les tendances de fond de l'évolution climatique. Un hiver très enneigé peut être perçu par les populations comme la preuve de la non-existence du changement climatique dans les Alpes alors qu'un hiver très sec sera la preuve que le réchauffement est bien réel.

La série climatique du col de Porte est à relativiser dans un contexte alpin complexe, les effets de sites étant importants dans la répartition de la neige [Scherrer et al., 2013]. Néanmoins, les tendances d'un manteau neigeux moins épais et durant moins longtemps croisées avec les ten-

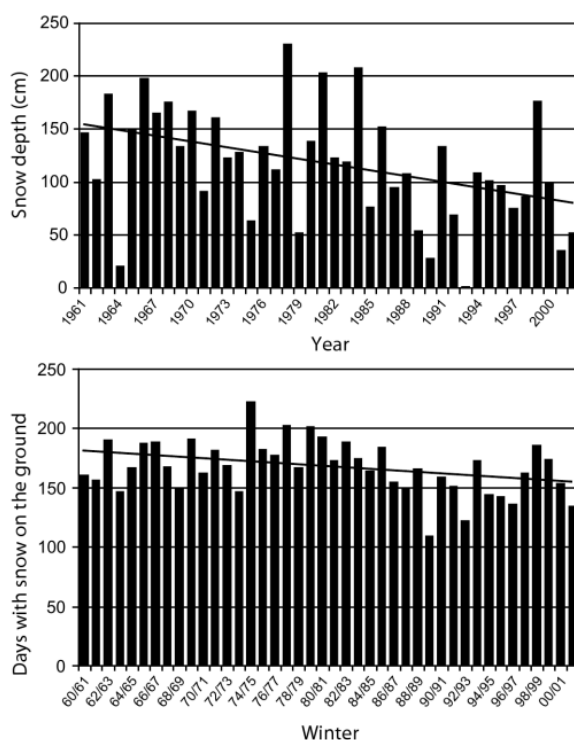


Figure B.3 – Évolution de la hauteur de neige moyenne mesurée entre le 11 et le 20 février (en haut) et du nombre de jours sans neige au sol en hiver (en bas) au col de Porte (Chartreuse, 1320 m d'altitude) de 1960 à 2003. *Source : [Martin et Etchevers \[2005\]](#)*

dances à l'augmentation des températures alpines laissent penser que l'impact du réchauffement climatique sur le manteau neigeux des Alpes est certain.

#### B - I - 4 Scénarios et perspectives d'évolution des précipitations et températures dans les Alpes

Dans les Alpes, les dernières décennies ont été marquées par un accroissement rapide des températures comparées au reste de l'hémisphère nord ainsi qu'à une légère modification du régime des précipitations. Du fait des phénomènes à long terme sur lesquels se développent les changements climatiques, il est plus que probable que ces modifications se confirment dans les années à venir. Afin de mieux comprendre et se préparer aux évolutions climatiques auxquelles les Alpes et leur environnement pourront être confrontées, des modèles climatiques basés sur des scénarios sont utilisés pour estimer l'ampleur des changements futurs.

La figure B.4 réalisée par [[Saulnier et al., 2011b](#)], fait une synthèse du scénario modéré A1B du rapport du GIEC de 2007 [[IPCC, 2007](#)] et de la tendance tirée des données HistAlp pour les températures moyennes des années 1900 à 2100. Sur cette figure sont surlignés en rouge deux scénarios d'augmentation des température +3°C et +5°C. Ce sont ces scénarios que nous utiliserons dans la suite de la thèse (*cf.* chapitre G).

Ces scénarios pourraient être revisités au vue des derniers résultats du GIEC. Néanmoins,

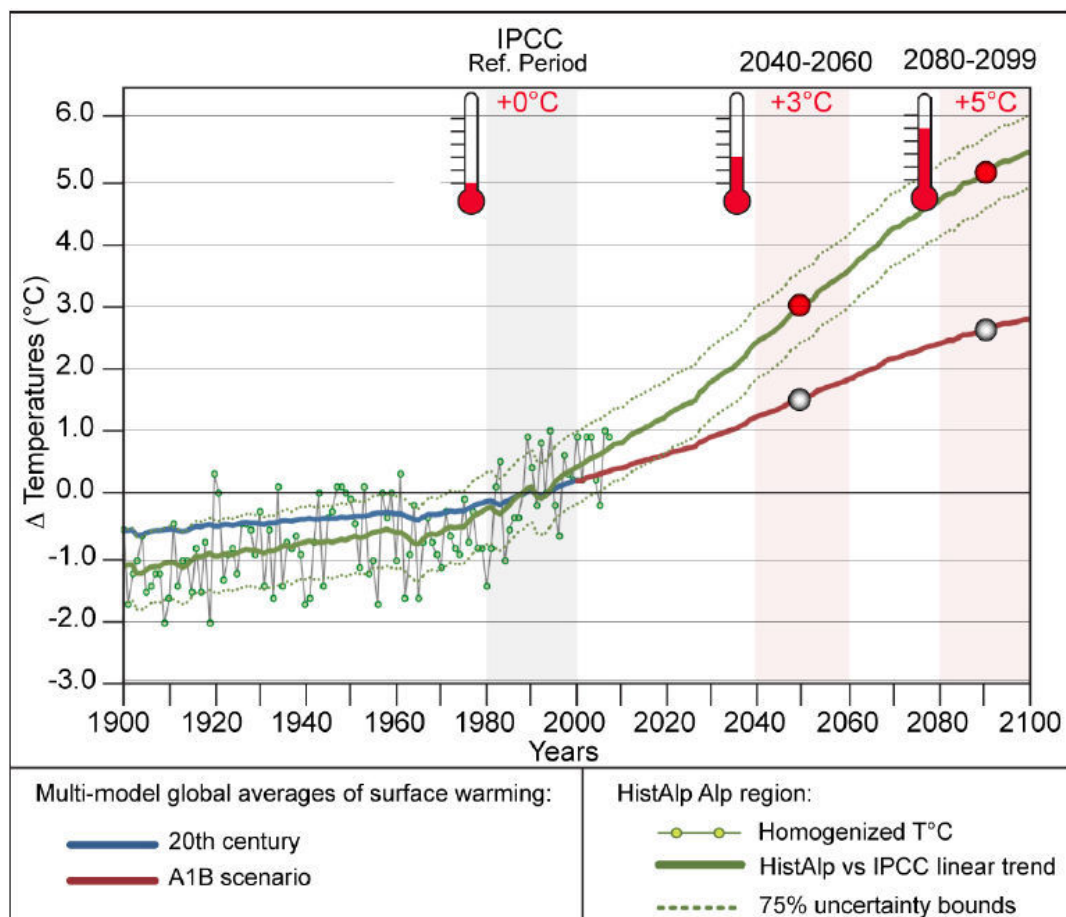


Figure B.4 – Comparaison des températures prévues par le scénario du GIEC A1B (en rouge) du rapport de 2007 [IPCC, 2007] et des températures extrapolées des données HistAlp (en vert) de 1900 à 2100. Source : Saulnier et al. [2011b]

C3-Alps s'inscrit dans la continuité des précédents projets de l'Espace Alpin, dont il est censé capitaliser les résultats (dont ceux d'Alp-Water-Scarce qui a produit la figure B.4). Néanmoins une accélération ou une diminution des hausses de températures, à ce stade de l'évolution du climat, ne changent pas la certitude de survenue de ces scénarios mais éventuellement leur échéance temporelle. Ainsi pour respecter le cahier des charges de C3-Alps nous utiliserons tels quels les scénarios produits par le projet Alp-Water-Scarce.

La figure B.4 présente une sensibilité accrue des Alpes par rapport au reste de l'Europe (elle-même plus touchée que la moyenne du globe terrestre) qui va certainement se poursuivre et s'accroître dans les années à venir. L'Agence Européenne de l'Environnement [EEA, 2009] synthétise les différents résultats des modèles régionaux pertinents sur les Alpes. Ces modèles confirment une augmentation des températures plus importante des Alpes par rapport au reste de l'Europe. En utilisant le scénario A1B, l'augmentation des températures est estimée à +3.9°C d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle contre +3.3°C en Europe. Comme la plupart des modèles climatiques [Pepin et Lundquist, 2008], ce scénario prévoit une hausse particulièrement forte dans les zones de hautes altitudes (>1500m) avec un réchauffement de l'ordre de +4.2°C.

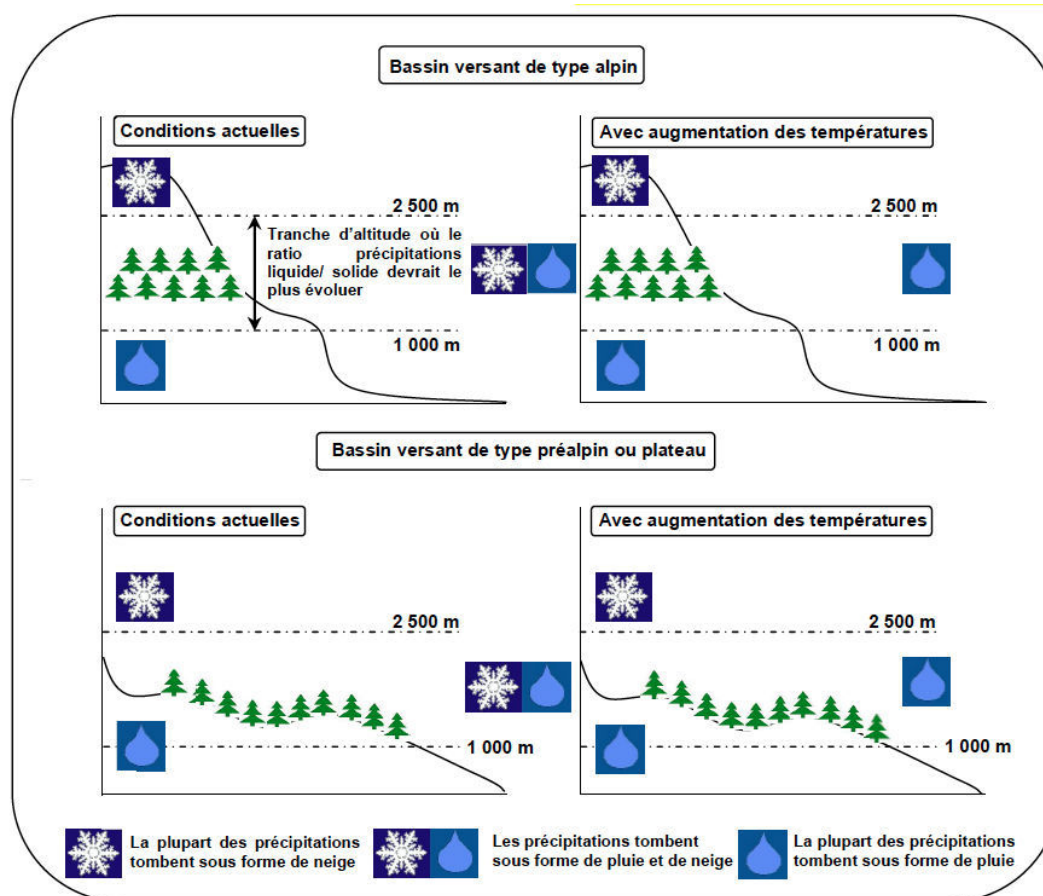


Figure B.5 – Évolution du ratio pluie/neige en hiver due à l'augmentation des températures alpines. Source : [ONERC \[2008\]](#)

Les modèles climatiques prévoient un réchauffement en deux temps : une première période avec un réchauffement plus faible puis une accélération du phénomène à partir de la deuxième moitié du 21<sup>ème</sup> siècle. La plus forte augmentation des températures est prévue pour la saison estivale avec des maximales allant jusqu'à +6°C [[ONERC, 2008](#)]. Comme pour les dernières décennies, la partie sud-ouest des Alpes semble plus sensible au réchauffement, ainsi que les zones de moyennes montagnes [[Bigot et Rome, 2010](#)], [[EEA, 2009](#)].

Du point de vue des précipitations, comme pour les tendances passées, les projections futures sont moins claires que pour les températures. Les variations saisonnières sont plus contrastées et permettent difficilement de dresser un tableau général de la situation future. Il est néanmoins très probable que la zone sud-ouest des Alpes sera la région la plus touchée par une baisse des précipitations annuelles confirmant la tendance actuelle. L'été semble être une nouvelle fois la saison la plus affectée par les changements climatiques et une baisse des précipitations. Les résultats montrent aussi que la fréquence des périodes sèches, définies comme plus de cinq jours sans précipitations, est amenée à augmenter significativement dans le futur et en particulier dans le nord de l'espace alpin où ce phénomène est rare dans les conditions climatiques actuelles.

Enfin du point de vue de la couverture neigeuse, [Etchevers et Martin \[2002\]](#) utilisent un

modèle pour simuler la hauteur de neige et le nombre de jours de neige futurs avec un scénario d'augmentation homogène des températures de  $+1.8^{\circ}\text{C}$  correspondant à l'horizon 2060 dans les projections A1B du rapport n°4 du GIEC [IPCC, 2007]. Les résultats montrent qu'à 1500 m d'altitude la diminution du nombre de jours par saison avec de la neige au sol serait de l'ordre d'un mois, passant ainsi de 5 à 4 mois d'enneigement dans les Alpes. Cette tendance serait accompagnée d'une diminution de l'ordre de 40 cm d'épaisseur de manteau neigeux.

Ces constatations sont liées à la fois à la diminution du manteau neigeux à l'élévation de la limite pluie-neige en hiver (figure B.5) dues à des températures plus élevées [Paccard, 2010]. L'impact des augmentations de température dans les Alpes sur le manteau neigeux est donc important [ONERC, 2008]. D'autant plus si l'on considère qu'Etchevers et Martin [2002] ont utilisé un scénario de  $+1.8^{\circ}\text{C}$  à l'horizon 2060 et que c'est une estimation de  $+3.9^{\circ}\text{C}$  qui est estimée pour la fin du siècle. Ces évolutions ne seront pas sans conséquences sur les ressources en eau alpines.

## B - II Les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau dans les Alpes

L'augmentation rapide des températures est le principal et le plus certain élément des changements climatiques à l'œuvre sur le territoire alpin (cf. section B - I en page 19). Cette évolution climatique a des impacts importants sur les ressources en eau des Alpes.

Par ressources en eau on entend les quantités d'eau, sous différentes formes (eaux de surface, neige et glace, eaux souterraines), sur un territoire à un instant donné. Ces ressources peuvent être plus ou moins mobilisables selon les situations. Dans cette section, nous explorerons comment les changements climatiques, et principalement l'évolution des températures, affectent les hydrosystèmes alpins et donc les ressources en eau de ce territoire. Dans un premier temps la spécificité des hydrosystèmes alpins sera évoquée pour mieux expliciter par la suite leur sensibilité aux changements climatiques.

### B - II - 1 Caractéristiques des hydrosystèmes alpins

Un hydrosystème se caractérise par plusieurs éléments s'entrecoupant et définissant les caractéristiques des écoulements en eau sur un territoire déterminé. Il est défini pour un espace géographique délimité, e.g. un bassin versant, par plusieurs composantes :

- une composante atmosphérique : précipitations, températures, évapotranspiration, etc.
- une composante superficielle : couverture végétale, sédiments et matière en suspension, ruissellements, torrents, rivières, etc.
- une composante souterraine : caractéristiques du sol, du sous-sol, aquifères et réseaux souterrains, etc.

Cette appellation d'hydrosystème insiste sur la notion de système et donc de connection entre différents éléments amenant au système hydrologique qui définit la manière dont les ressources en eau se répartissent et évoluent sur un territoire. L'accent est mis sur les processus et les



phénomènes d'interfaces. Sa définition est toujours liée à une dimension géographique qui peut être très locale (quelques km<sup>2</sup> ) ou très étendue (plusieurs milliers de km<sup>2</sup>) selon les recherches menées. En étudiant les processus et les entrées/sorties d'un système hydrologique, il est possible de modéliser le fonctionnement de l'hydrosystème afin d'en étudier les différentes composantes et leurs interactions. C'est ce qui sera présenté ultérieurement dans cette thèse.

Dans cette thèse nous entendons le terme hydrosystème comme un système naturel qui peut néanmoins être perturbé par des actions humaines. Par exemple, le déboisement d'une parcelle entraînera une érosion plus intense sur cette parcelle susceptible de modifier fortement le comportement des écoulements d'eau et donc de modifier le fonctionnement de l'hydrosystème. Pour des définitions plus détaillées sur la notion d'hydrosystèmes, le livre de [Amoros et Petts \[1993\]](#) présente les bases et détaille les composantes de cette notion.

Les hydrosystèmes alpins sont caractérisés par des régimes hydrologiques dépendants fortement des quantités de neiges hivernales et, sur certaines zones des Alpes, de la présence de glaciers. Des zones de stockages d'eau, appelées réservoirs, sont présents sous différentes formes dans les hydrosystèmes. Les lacs (naturels et artificiels), les glaciers, la couverture neigeuse, l'eau du sol et souterraine constituent des réservoirs dans lesquels l'eau est temporairement stockée. La neige et la glace constituent des réservoirs d'eau majeurs des hydrosystèmes alpins dont les stocks sont restitués au milieu naturel dès que les températures passent le point de fusion, transformant l'eau solide en eau liquide. Les écoulements sont donc plus importants au printemps ou en été suivant l'altitude considérée et la configuration de l'hydrosystème.

La figure [B.6](#) présente les différents types de régimes hydrologiques rencontrés sur le territoire suisse, lui-même presque intégralement englobé dans l'espace alpin. On constate que les régimes alpins sont caractérisés par un pic de hautes eaux entre mai et juillet. La différence temporelle de ce pic dépend de la quantité de glace du bassin versant. Plus les glaciers sont présents dans le bassin versant et plus le pic de hautes eaux arrivera tard. A contrario, si la quantité de neige est la composante principale du bassin versant, le pic de hautes eaux arrivera plus tôt, vers la fin du printemps. Enfin, un régime hydrologique alpin de plus basse altitude, où la composante neige et glace est moindre, présente un pic des hautes eaux plus précoce en mars ou avril.

De même, selon la composante principale glace, neige ou pluie, la période d'étiage des hydrosystèmes alpins s'échelonne entre octobre et mars. On peut néanmoins retenir que c'est en hiver que les quantités d'écoulements sont les plus faibles dans les Alpes. Une description détaillée des différents régimes hydrologiques rencontrés dans les Alpes est présentée dans l'ouvrage de [Musy et al. \[2014\]](#).

La description des régimes hydrologiques alpins montrent une sensibilité accrue de ces hydrosystèmes aux températures. En effet, la température est le facteur déclenchant de la fonte des glaces et des neiges qui sont un des moteurs principaux des écoulements dans le système alpin. De fait, ces régimes hydrologiques peuvent connaître des variations diurnes relativement élevées pendant la saison chaude ainsi que de grandes variations annuelles des précipitations neigeuses. La quantité et la saisonnalité des écoulements sur le territoire alpin sont donc hautement sensibles à :

- la température printanière et estivale instigatrice de la fonte des glaces et neiges

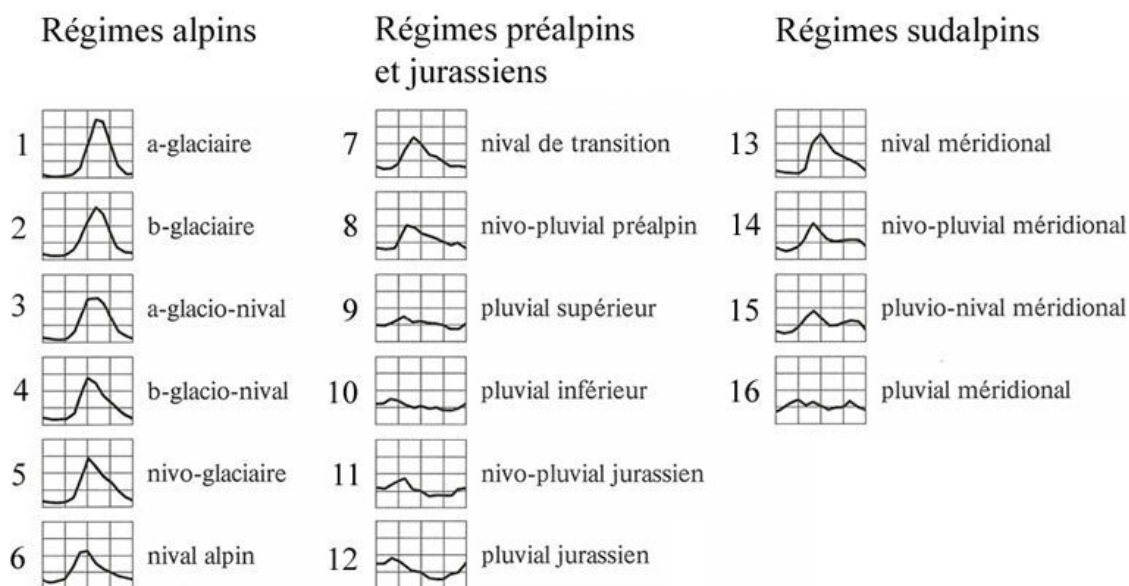


Figure B.6 – Les 16 types de régimes hydrologiques de la Suisse. *Source* : <http://www.bafu.admin.ch>

- la température hivernale permettant les précipitations sous forme solide (neige)
- la quantité de précipitations, en particulier pendant l'hiver.

## B - II - 2 Impacts des changements climatiques sur les hydrosystèmes alpins

Les hydrosystèmes alpins sont dominés par des processus dépendants fortement des conditions de températures et précipitations (*cf.* section précédente). L'impact des changements climatiques dans les Alpes répertoriés dans la section B - I risque donc d'être notable et d'impliquer un certain nombre de modifications du fonctionnement de ces hydrosystèmes.

La première constatation est que même si les tendances pour les précipitations sont peu certaines, l'impact du réchauffement climatique constaté dans les Alpes depuis 1950 a et continuera à avoir une incidence sur la période des hautes eaux. Premièrement, l'augmentation des températures hivernales a pour conséquence une moins grande accumulation de neige hivernale, ce qui a pour effet d'augmenter les débits hivernaux et de diminuer l'ampleur du pic de débits printaniers ou estivaux. Cet effet de réduction est observé par l'*OFEV* [2012] qui a effectué des simulations de modifications des régimes hydrologiques pour 189 bassins versants suisses en fonction des scénarios climatiques envisagés pour ce territoire. La rivière Simme (figure B.7) voit son maximal du mois de mai significativement réduit dans les conditions climatiques scénarisées pour 2035 et 2085 à mesure que les températures augmentent.

Deuxièmement, l'augmentation des températures printanières et hivernales a pour effet de raccourcir la période de présence de la neige du fait de températures trop élevées. Ainsi, la période



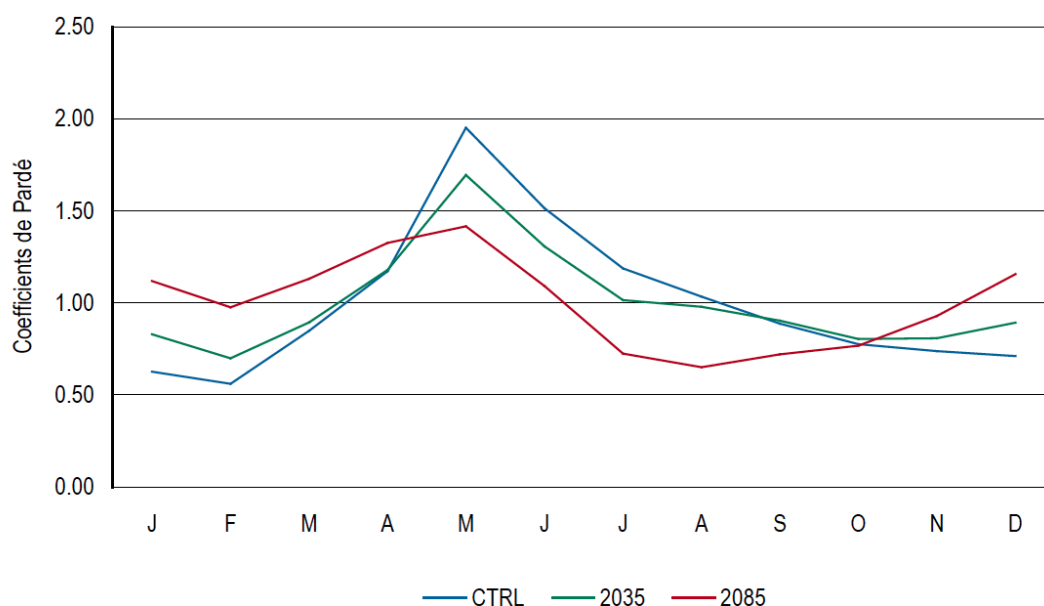


Figure B.7 – Évolution du régime hydrologique de la Simme (Suisse) dans les conditions météorologiques de 2035 et de 2085 (*i.e.* +0.9°C à + 1.4°C et précipitations similaires aux conditions actuelles pour 2035. +2.7°C à +4.1°C et précipitations plus faibles de 18 à 24 % par rapport aux conditions actuelles pour 2085). Ces évolutions climatiques dépendent de la région et de la saison considérées. (Pour plus de détails sur les scénarios climatiques utilisés consulter le rapport [CH2011 \[2011\]](#)). Source : [OFEV \[2012\]](#)

de hautes eaux arrive-t-elle plus tôt dans la saison que précédemment [[Massarutto, 2011](#)], [[Bates et al., 2008](#)]. [Barnett et al. \[2005\]](#) montrent qu'un hydrosystème montagneux des Etats-Unis, fortement dominé par la fonte du stock de neige hivernal, donc similaire aux hydrosystèmes alpins, verra son pic de hautes eaux se produire un mois plus tôt que ce n'est le cas actuellement en 2050, du fait du réchauffement des températures. L'étude estime que dans cette région il n'y aura pas de capacité de stockage artificiel suffisant pour garder cette eau arrivée précocement sur le territoire, de sorte qu'elle sera en partie perdue pour cet espace.

Pour les bassins versants fortement englacés, ce qui est le cas de la majeure partie des zones de hautes altitudes alpines, l'évolution des débits se fait différemment que pour les régimes hydrologiques plus influencés par la neige. En effet, les glaciers sont un réservoir d'eau "fossile" qui se constitue au fil des siècles et qui est présent toute l'année sur le territoire. L'augmentation des températures a pour effet de faire fondre de manière accrue la glace. Cette fonte accélérée injecte plus d'eau dans les hydrosystèmes et génère donc des débits estivaux plus importants. Néanmoins, une fois les glaciers complètement fondus, cette source d'eau fossile aura disparue et ne contribuera plus aux débits qui diminueront donc drastiquement. Cette diminution sera bien plus abrupte que dans les hydrosystèmes plus influencés par la quantité de neige hivernale dont la quantité bien que réduite se renouvelle chaque année.

La figure B.8 présente l'évolution de ces régimes glaciaires pour deux bassins versants suisses : l'Aletsch, dont la surface englacée est de 123 km<sup>2</sup> et l'altitude moyenne 2925 m et le Trift, dont la surface englacée est de 18 km<sup>2</sup> pour une altitude moyenne de 2570 m. Sur cette figure, on

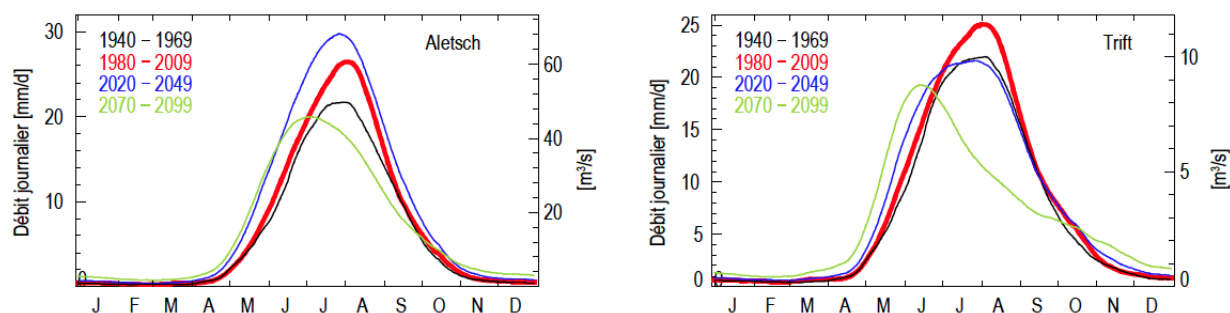


Figure B.8 – Évolution des régimes hydrologiques du bassin versant d'Aletsch et Trift pour 4 périodes : 1960-1969, 1980-2009, 2020-2049, 2070-2099. *Source* : [OFEV \[2012\]](#)

peut observer les différents effets du changement climatique sur les hydrosystèmes de montagne évoqués dans cette section. Tout d'abord, le pic de hautes eaux est largement diminué pour la période la plus lointaine (2060-2099) montrant bien la diminution de la contribution des eaux de fonte à l'hydrosystème. Deuxièmement, ce pic arrive plus tôt dans l'année. Ce phénomène est très visible pour le bassin versant du Trift avec un décalage de presque 4 mois entre la période actuelle et la période la plus lointaine. Enfin, on observe que plus la surface englacée est importante plus la diminution des débits de pointe sera importante. Le bassin versant d'Aletsch sera plus impacté que le celui du Trift. Cette étude montre que les régimes hydrologiques de type glaciaire sont amenés à disparaître presque intégralement du territoire suisse à l'horizon 2050.

Les évolutions des hydrosystèmes constatées précédemment répondent à la modification des réservoirs présents. En effet, la majeure partie des réservoirs naturels (manteau neigeux, eaux souterraines, eaux du sol et les glaces) se remplissent ou s'accumulent en hiver et perdent leurs volumes en été [[OFEV, 2012](#)]. Seuls certains lacs et barrages n'ont pas ce comportement (ce qui pose la question du rôle que les barrages pourraient potentiellement avoir dans l'atténuation de certains impacts du changement climatique sur les débits). L'augmentation des températures a pour effet de modifier cette saisonnalité établie. Les variations saisonnières seront d'autant plus marquées sur les bassins versants de petites tailles et ayant de fortes surfaces englacées et/ou enneigées. Plus les bassins versants sont situés en altitude et plus les variations saisonnières seront marquées [[Köplin et al., 2012](#)].

L'augmentation des températures alpines a pour conséquence une évolution de la quantité et de la saisonnalité des écoulements montagneux. La transformation des pluies solides en pluies liquides a pour effet d'augmenter les débits hivernaux et donc de décaler les périodes d'étiages. La modification de la saisonnalité des réservoirs a pour conséquence d'avancer également la période des hautes eaux. Cela induit une modification importante dans la gestion de l'eau. En effet en montagne, les précipitations sont plus importantes pendant la saison hivernale qu'estivale. La diminution des réserves d'eau plus précoces dans les hydrosystèmes alpins a pour conséquence une atténuation des débits estivaux qui ne peut pas être compensée par les précipitations. Les périodes de sécheresse sont donc amenées à augmenter ces prochaines années. Ce phénomène sera accentué par l'augmentation des températures plus marquées en été ainsi qu'une diminution probable des précipitations pour cette même période (*cf.* section B - I).

### B - II - 3 Impacts des évolutions des hydrosystèmes alpins dues aux changements climatiques sur la gestion de l'eau actuelle et future

En matière d'hydrologie, les Alpes sont très souvent décrites comme "le château d'eau de l'Europe". Cette métaphore très employée vient du fait que la neige et les glaciers présents en quantité dans les Alpes représentent un énorme stock d'eau relâchée à la saison sèche. Ces énormes quantités d'eau fournissent donc un débit de base au moment où les précipitations et le ruissellement sont au plus bas. Ce phénomène est particulièrement visible à la fin de l'été où l'eau en provenance des Alpes constitue une importante part des débits, incluant ceux des quatre principaux fleuves alpins : le Rhin, le Rhône, le Danube et le Po [EEA, 2009].

Le réchauffement des températures alpines engendrent une fonte précoce des neiges et glaciers modifiant les capacités de ces réservoirs naturels. Ainsi l'utilisation du "château d'eau" que représente les Alpes va être modifiée dans les prochaines années. La gestion de cette eau va donc elle aussi être amenée à évoluer.

La gestion de l'eau actuelle se base sur des données historiques dans un certain nombre de domaines (prévention des crues, autorisations de prélèvement, etc.) qui ne seront plus valables dans les années à venir. [Viviroli et al. \[2011\]](#) mettent en évidence la nécessité de rompre avec une gestion de l'eau stationnaire, c'est-à-dire se basant sur des données historiques pour équilibrer les ressources et la demande ainsi que pour protéger les populations des risques naturels. En effet, ces données historiques sont cohérentes dans un climat stable mais lorsque celui-ci évolue, il est nécessaire de les réajuster.

L'autre défi de la gestion de l'eau dans un contexte de changements climatiques vient du fait que les capacités de stockage artificielles actuelles dans les territoires montagneux, ne permettent pas de capter et stocker l'eau relâchée précocement dans le milieu du fait de l'augmentation des températures [Barnett et al. \[2005\]](#). L'eau non captée et non stockée est donc perdue pour ces territoires qui ne peuvent pas l'exploiter. De plus, l'augmentation de l'eau relâchée dans le milieu due à la fonte des glaciers peut faire temporairement croire que la situation actuelle est bonne et non menaçante vis-à-vis des pénuries d'eau. Néanmoins il est nécessaire de regarder à plus long terme et d'anticiper la disparition de certains glaciers et simultanément le tarissement de l'eau relarguée au printemps et en été. La diminution des débits estivaux provoquera une période sèche pendant laquelle des conflits d'usages peuvent apparaître du fait de la diminution de la ressource disponible.

Les conflits d'usages ne sont pas uniquement liés aux changements climatiques mais également à la consommation d'eau anthropique. C'est pour cela que la *gestion de l'eau* est nécessaire afin de mettre en adéquation les ressources en eau disponible et les demandes en eau des différents usages. La difficulté résulte de la non linéarité, premièrement des ressources qui évoluent pendant l'année et sur le long-terme du fait des changements climatiques et deuxièmement des prélèvements, eux-aussi non constants toute l'année et amenés à évoluer en fonction de l'adaptation des territoires aux nouveaux régimes hydrologiques. Il y a donc un intérêt à regrouper ces différentes évolutions au sein d'un même outil pour une vision globale des impacts de chacune.

Les situations conflictuelles ne sont pas attendues toute l'année mais sur des pics de consom-

mation déterminés. La saison hivernale a déjà présenté des conflits entre usages dans les Alpes dus aux évolutions climatiques et anthropiques. Pendant la période hivernale, trois demandes augmentent brusquement et de manière concomitante :

- la demande en électricité, plus forte du fait des températures froides, provoque une augmentation de l'eau turbinée par l'hydroélectricité car l'énergie produite par les centrales hydroélectriques est moins chère que celle générée par d'autres centrales (nucléaire, charbon)
- la demande en eau domestique augmente du fait de l'arrivée des touristes sur le territoire alpin
- la demande en neige de culture du fait du réchauffement des températures hivernales engendre une augmentation de la consommation d'eau pour garantir le minimum de skiabilité

La gestion de l'eau dans les Alpes doit donc faire face à ces modifications afin d'éviter autant que possible les situations conflictuelles et les pénuries d'eau. [EEA \[2009\]](#) et [Massarutto \[2011\]](#) reprennent les principaux usages de l'eau dans les Alpes et les conséquences qu'ont les changements climatiques sur leur gestion. Pour une revue détaillée sur les domaines étudiés qui sont : la biodiversité, la consommation d'eau potable par les ménages, la foresterie, l'agriculture, le tourisme, l'énergie, l'industrie et la navigation sur rivières, on pourra se référer au rapport de [EEA \[2009\]](#) .

## B - III Conclusion

Dans la globalité du changement climatique mondial, les zones enneigées et englacées subissent plus fortement les augmentations de températures moyennes. Les Alpes se sont ainsi réchauffées plus rapidement que le reste de l'Europe entraînant une diminution de la couverture neigeuse. Cette tendance va se poursuivre du fait de la poursuite de l'augmentation des températures.

Les impacts de la diminution de la couverture neigeuse et glacière sont importants pour les hydrosystèmes alpins. Une diminution des débits printaniers et estivaux est à prévoir pouvant engendrer une augmentation des sécheresses estivales. La modification des hydrosystèmes alpins entraîne de fait une évolution de la saisonnalité de la ressource en eau disponible pour les activités anthropiques des territoires de montagne. Le gestionnaire devra donc s'adapter à ces nouvelles disponibilités afin d'éviter l'apparition de pénurie d'eau et promouvoir un développement économique durable pour son territoire. Plus il pourra anticiper ces évolutions et plus il sera en mesure de s'y adapter.

Fort des constatations de l'impact des changements climatiques sur nos systèmes anthropiques, la communauté internationale s'est investie dans le développement de réponses à cette problématique. Deux options ont alors été développées : l'atténuation et l'adaptation. Le chapitre suivant présente le développement de ses réponses au niveau international et leurs déclinaisons au niveau national et alpin.



---

### Les réponses politiques aux changements climatiques : atténuation et adaptation

---

Les changements climatiques sont maintenant une certitude sur le territoire français et en particulier dans les Alpes. Leurs impacts ont un fort potentiel de modification de notre qualité de vie et des activités socio-économiques sur le territoire. Les instances politiques ont depuis quelques années pris conscience de ce potentiel dommageable et apporte deux réponses spécifiques : l'atténuation des changements climatiques et l'adaptation aux changements climatiques.

Dans ce chapitre, nous définirons ces deux réponses politiques et retracerons les différentes mesures mises en place dans ces domaines. Une description plus détaillée du programme européen C3-Alps qui a porté cette thèse sera développée en fin de chapitre.

#### C - I L'atténuation des changements climatiques

##### C - I - 1 La réponse la plus ancienne

L'atténuation aux changements climatiques consiste à prendre des actions visant à stabiliser ou réduire les émissions de gaz à effets de serre dans l'atmosphère. L'objectif est de diminuer l'augmentation du réchauffement climatique lié en partie aux concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ces gaz à effet de serre ont un impact majeur sur le réchauffement climatique augmentant l'effet de serre naturel de la Terre. Or les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique ont grandement augmenté depuis la période industrielle. L'atténuation cherche donc à résoudre les causes (ou du moins une des causes) du changement climatique partant du principe

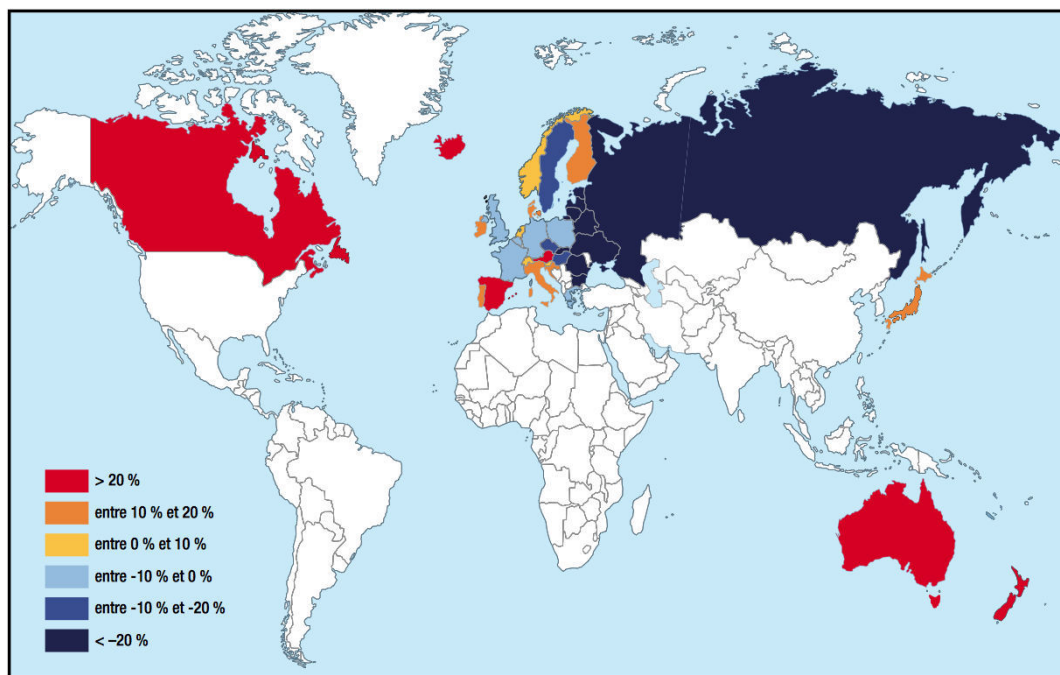


Figure C.1 – État des lieux du respect des engagements des pays signataires de la première période du protocole Kyoto en 2007 (en % d'émissions de gaz à effet de serre par rapport aux engagements pris). *Source : Caisse des dépôts [2009]*

qu'en réduisant ou minimisant les émissions de gaz à effet de serre, l'effet de serre résiduel généré par ces derniers diminuerait aussi et par voie de conséquence limiterait le réchauffement climatique.

L'atténuation a été la première réponse politique à être mise en place. Historiquement, c'est lors du Sommet pour la Terre ou conférence de Rio en 1992 qu'a été reconnue l'existence des changements climatiques induits par les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines. Un engagement a été pris par les pays industrialisés volontaires, jugés comme responsables de la majeure partie des émissions comparés aux pays en voie de développement, de lutter contre ce phénomène. L'objectif était de "stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique" et ce en convenant "d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable". C'est la définition de l'atténuation utilisée par le GIEC [[IPCC, 2014b](#)].

Le protocole de Kyoto ratifié en 1997 et mis en œuvre en 2005 instaure les engagements des États signataires dans la réduction des gaz à effet de serre. L'objectif était une diminution de 5% des gaz à effet de serre à l'horizon 2012 par les pays signataires. Le bilan de la première période du protocole Kyoto est mitigé (figure C.1). Certains pays sont allés au-delà de leurs engagements (e.g. la France, l'Allemagne, la Russie, etc.) tandis que d'autres n'ont pas respecté les leurs (e.g. Canada, Australie, Espagne, etc.).

La restructuration économique des pays de l'ex-URSS a permis de faire grandement baisser les

émissions de gaz à effet de serre et ainsi de compenser la hausse due aux émissions des Etats-Unis établissant ainsi un total nul pour les pays industrialisés pendant la première période du protocole de Kyoto. Néanmoins pendant ce temps la production de gaz à effet de serre des pays en voie de développement qui n'étaient soumis à aucune obligation dans la première partie du protocole de Kyoto, a augmenté de plus de 500 Mt par an devenant ainsi les premiers producteurs de gaz à effet de serre [*Caisse des dépôts*, 2009]. Le total des émissions de gaz à effet de serre mondial est donc en augmentation malgré le protocole de Kyoto.

En 2011, les pays ont renouvelé leur accord afin que le protocole de Kyoto soit prolongé après 2012 (deuxième période d'engagement du protocole). L'Union Européenne s'est engagée à réduire ses émissions de -20% par rapport aux émissions de 1990. Elle a mis en place un Paquet Energie Climat fournissant un panel législatif et politique en faveur des réductions de gaz à effet de serre pour ses états membres<sup>1</sup>. Ainsi chaque État membre de l'UE doit définir une politique nationale pour atteindre les objectifs du protocole de Kyoto et du Paquet Energie Climat. La section suivante détaille les politiques d'atténuation mise en place en France qui découlent de ces engagements.

## C - I - 2 Les politiques d'atténuation aux changements climatiques en France

Au niveau national, la première réponse politique pour l'atténuation au changement climatique remonte à 1992 avec la création de la mission interministérielle sur l'effet de serre. Cependant c'est plutôt durant les années 2000 que se met véritablement en place la politique d'atténuation en France. D'abord par la création d'un programme national de lutte contre le changement climatique en 2000, puis par l'adoption d'une loi déclarant la lutte contre le changement climatique priorité nationale avec la création de l'ONERC (Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique) en 2001.

La déclinaison nationale des engagements de la France lors de sa signature du protocole de Kyoto est traduite à travers les différents plans climats. Le premier plan climat engagé en 2004, fixait la non augmentation (stabilisation) des gaz à effet de serre de la France en 2012 au niveau de celles de 1990 et cela malgré la croissance socio-économique prévue [*MEDD*, 2004]. Des objectifs dans tous les secteurs de l'économie sont fixés pour atteindre ce résultat.

En 2005, la loi fixant les orientations de la politique énergétique française va plus loin dans l'engagement du pays pour la réduction des gaz à effet de serre. Cette loi met au coeur de la politique énergétique la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre et fixe un objectif d'une diminution par quatre des émissions de gaz à effet de serre français à l'horizon 2050 correspondant à une diminution de 3% par an. Cette loi prévoit également la révision du plan climat national tous les deux ans.

En 2007, la politique de lutte contre le changement climatique a été renforcée par les conclusions du Grenelle de l'environnement. Par exemple, ce dernier a imposé la mise en place des Plans Climats Territoriaux pour les collectivités territoriales de plus de 50 000 habitants.

---

1. <http://www.developpement-durable.gouv.fr>



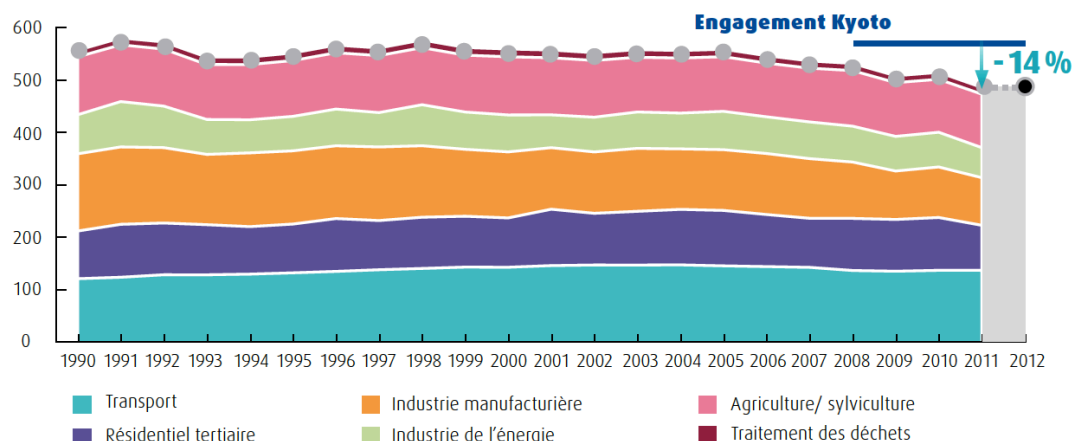


Figure C.2 – Évolution des émissions de gaz à effet de serre (en million de tonnes équivalent CO<sub>2</sub>) de la France de 1990 à 2012. *Source : MEDDE [2013]*

La France est un des pays industrialisés le moins émetteurs de gaz à effet de serre du fait de la faible utilisation du charbon et du gaz pour la production d'énergie et de la forte utilisation du nucléaire et de l'hydrologie. Depuis la mise en place des politiques d'atténuation, la France a réussi à réduire de 13% les émissions de gaz à effet de serre de son territoire par rapport au niveau de 1990 malgré une augmentation de 40% du PIB (Figure C.2).

Malgré ces bons résultats, les réductions d'émissions sont encore trop faibles au vue des objectifs fixés par la loi de 2005. En effet l'objectif de diminution des gaz à effet de serre par quatre d'ici 2050 impose une réduction annuelle de 3% par an. Actuellement, le taux moyen de réduction est de l'ordre de 2% par an. Les politiques d'atténuation au changement climatique et leur mise en oeuvre concrète doivent donc se poursuivre sur le territoire français pour espérer atteindre les objectifs fixés.

Pour une analyse complète et détaillée des émissions des gaz à effet de serre en France ainsi que des mesures mises en place pour atteindre les objectifs cités, le rapport de [CITEPA, 2014] est conseillé.

## C - II L'adaptation aux changements climatiques

### C - II - 1 Le résultat d'un constat : l'atténuation n'est pas suffisante

Lors de la conférence des nations sur le changement climatique de Copenhague en 2009, l'objectif d'une limitation du réchauffement climatique global à 2°C d'ici la fin du siècle avait été discuté par les parties prenantes. Cet objectif passe par une réduction de 40% à 70% des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050.

Or, même si un grand nombre de politiques d'atténuation ont vu le jour ces dernières décennies (*cf.* section C - I ), les émissions de gaz à effet de serre mondiales augmentent toujours plus rapidement (+2.2% par an entre 2000 et 2010 contre 1.3% par an entre 1970 et 2000

[[IPCC, 2014b](#)]). Ainsi, sans une réduction drastique des gaz à effet de serre mondiaux passant par des modifications profondes de nos modes de vie d'ici 2050, il apparaît plus probable que l'augmentation de la température mondiale soit de l'ordre de 3.7 à 4.8°C.

Quand bien même, les États arriveraient à atteindre cet objectif très ambitieux, une augmentation de la température moyenne de 2°C entraînera des impacts majeurs dans le monde et en Europe avec un impact plus rapide sur les zones montagneuses (*cf.* section [B - II](#) page 27).

Ce constat a amené les pays à prendre en parallèle des politiques d'atténuation du changement climatique, des politiques d'adaptation à ces changements. L'adaptation aux changements climatiques consiste à anticiper ses impacts afin de limiter les dommages potentiels et de tirer partie autant que possible de ces changements inéluctables. Il s'agit de mettre en œuvre des mesures permettant de répondre aux nouvelles conditions imposées par les changements climatiques et ainsi de réduire la vulnérabilité d'un territoire.

Les politiques d'adaptation sont bien plus récentes que celles d'atténuation. Durant la décennie 1990, l'adaptation était complètement ignorée. Lors des négociations internationales sur le climat à cette période, parler d'adaptation était conçu comme un aveu d'échec, une vision défaitiste montrant que malgré tous les efforts fournis pour la réduction des gaz à effet de serre, ces mesures échoueraient [[ONERC, 2012](#)], [[Rousset, 2012](#)]. Ainsi c'est seulement en 2005, qu'un programme de travail sur l'adaptation est lancé par la convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique. C'est avec les accords de Bali de 2007 que l'adaptation prend presque autant part que l'atténuation aux accords signés. Pour un historique complet de la naissance des politiques d'adaptation et de leurs rapports avec les politiques d'atténuation, la thèse de [Rousset \[2012\]](#) est conseillée.

La politique climatique d'un pays ne se limite donc pas à l'atténuation mais également à la mise en place de solution d'adaptation. Ces deux axes sont complémentaires bien que pouvant parfois entrer en contradiction. Pour résumer, l'adaptation consiste à réduire la vulnérabilité vis-à-vis des incidences du changement climatique tandis que l'atténuation consiste à réduire les interférences humaines sur le climat, notamment en réduisant les gaz à effet de serre. Il s'agit des deux piliers d'une politique climatique équilibrée (*cf.* figure [C.3](#)).

## C - II - 2 Les politiques d'adaptation en France

La France a été l'un des premiers pays européens à adopter une stratégie nationale d'adaptation au changement climatique. Ainsi en 2006, la stratégie nationale d'adaptation au changement climatique affirme que l'adaptation doit réduire la vulnérabilité de la France face aux conséquences du changement climatique avec quatre grandes finalités [[ONERC, 2012](#)] :

- protéger les personnes et les biens en agissant sur la sécurité et la santé publique
- tenir compte des aspects sociaux et éviter les inégalités devant les risques
- limiter les coûts et tirer parti des avantages
- préserver le patrimoine naturel

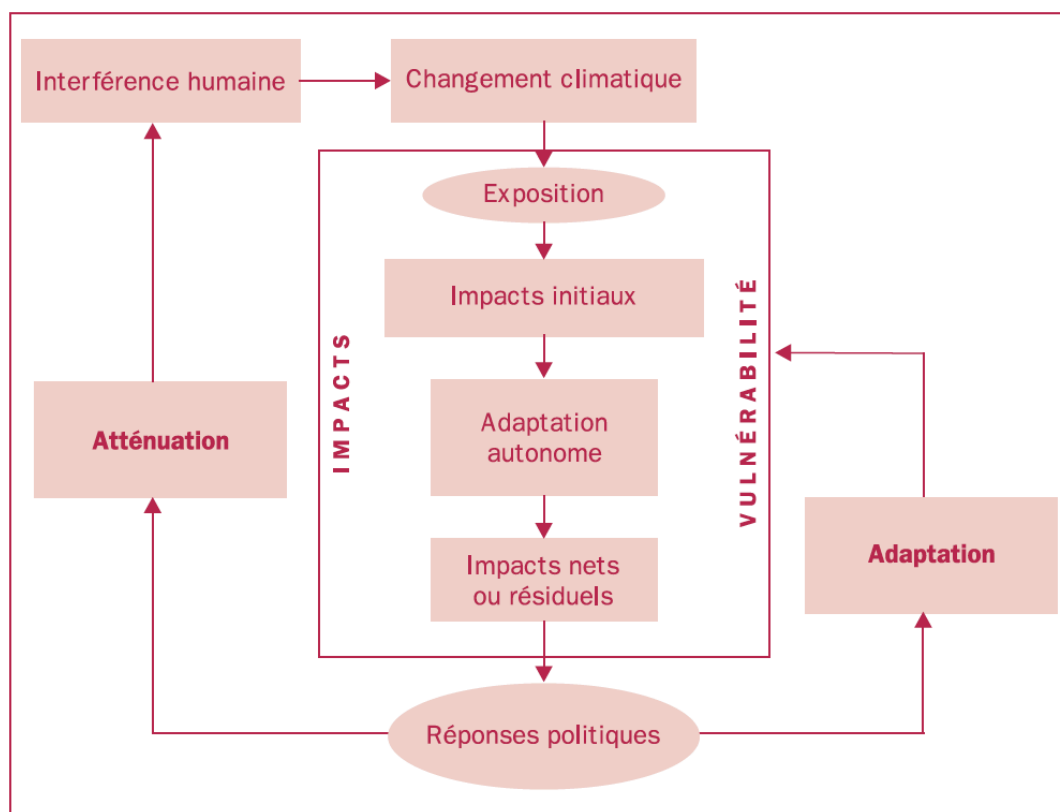


Figure C.3 – Deux réponses politiques aux changements climatiques : l'atténuation et l'adaptation.  
Source : [ONERC](#) [2007]

La stratégie d'adaptation doit anticiper les situations de crises et diminuer les risques en associant l'ensemble des acteurs impactés par les changements climatiques. Les assurances même si elles sont un outil de gestion intéressante ne doivent pas être considérées comme l'unique recours. Les aides et subventions pour favoriser les évolutions et diversifications économiques doivent être envisagées. Enfin, les mesures d'adaptation doivent être en cohérence avec la politique d'atténuation menée en parallèle.

La stratégie d'adaptation stipule également la volonté d'une démarche intégrée par milieux et non par secteur. Ainsi les vulnérabilités des milieux telles que le littoral et la mer, la ville, la montagne et la forêt doivent être abordées via un prisme global et non sectoriel.

Les principes de la stratégie nationale d'adaptation au changement climatique française ont été déclinés dans un plan opérationnel approuvé pour la période 2011-2015 : le plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) [[MEDDTL, 2011](#)]. Ce plan retrace vingt fiches actions concrètes dans divers domaines pour l'adaptation au changement climatique. Première européenne, le PNACC identifie les mesures à mettre en place ainsi que les institutions devant les piloter. Il établit une feuille de route pour quatre ans et sera révisé sur les bases des évaluations du plan précédent.

Au niveau local, les politiques d'adaptation au changement climatique sont déclinées à travers trois éléments : les agendas 21, les Plans Climat Énergie Territoriaux (PCET) et les Schémas Régionaux du Climat, de l'Air et de l'Énergie (SRCAE).

Le PCET se fait au niveau des communautés de communes ou d'agglomérations. Il a été rendu obligatoire aux communes de plus de 50 000 habitants en 2010. Les PCET doivent s'intégrer aux politiques territoriales et mettre en place dans tous les secteurs des objectifs d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Les PCET ont deux échéances de temps : 2020 avec la fin de la seconde période des engagements de Kyoto et 2050 avec l'objectif de réduction par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France (*cf.* section [C - I](#)).

Le SRCAE est basé sur le même principe au niveau régional. Il doit définir les orientations et les objectifs régionaux aux horizons 2020 et 2050 en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre, de maîtrise de la demande énergétique, de développement des énergies renouvelables, de lutte contre la pollution atmosphérique et d'adaptation au changement climatique.

Ces deux plans territoriaux permettent donc de décliner le plan d'adaptation et d'atténuation au changement climatique au niveau local. Un de leur point fort est cette projection vers 2020 et 2050 qui permet d'établir un plan et des actions sur le long terme.

### C - II - 3 L'adaptation dans les Alpes : rapide état des lieux

Les Alpes ont une vulnérabilité accrue aux changements climatiques tant physique (*cf.* section [B - I](#) page 19) que socio-économique. En effet, l'économie alpine est largement structurée par le tourisme notamment hivernal [[George-Marcelpoil et Boudières, 2008](#)] qui représente une part importante de son économie. [ODIT \[2009\]](#) estime à 9,64 milliard € la consommation intérieure liée à l'activité touristique. Du point de vue de l'emploi, la part des activités salariées liée au

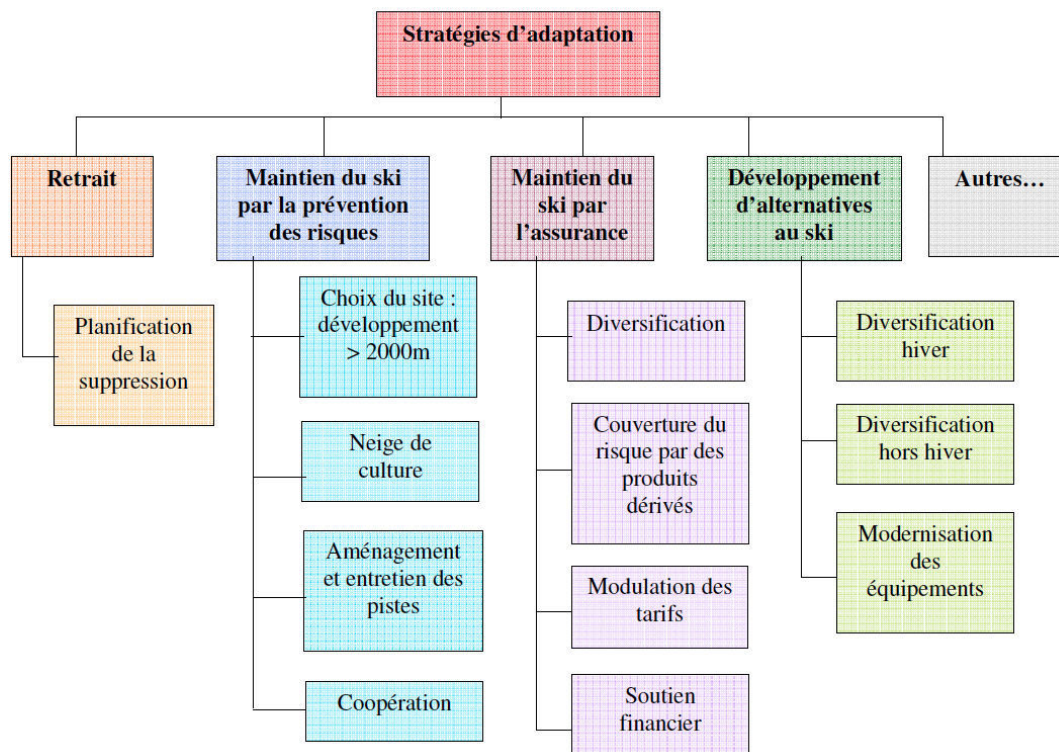


Figure C.4 – Les différentes mesures d'adaptation imaginées pour les Alpes. *Source* : [Langevin, 2008]

tourisme en montagne est évaluée à 30% environ dans les Alpes.

L'activité touristique alpine est une activité de plein air hautement liée au climat. Ainsi, l'anticipation des changements de ce climat est vitale afin de s'adapter au mieux. Langevin [2008] a établi une classification des différentes opportunités d'adaptation qui s'offrent pour l'économie des sports d'hiver dans le massif alpin (figure C.4).

De par ces caractéristiques les Alpes, comme d'autres massifs, constituent une excellente zone pilote pour mettre en place des stratégies d'adaptation aux changements climatiques. Ces dernières années, quelques stratégies d'adaptation ont commencé à voir le jour même si elles restent encore marginales et souvent au stade de la sensibilisation.

La Convention Alpine est un traité de droit international réunissant les huit États ayant une partie de leur territoire dans les Alpes. L'objectif est la promotion du développement durable dans le massif alpin ainsi que la protection des intérêts de ses habitants. Basée sur la constatation que l'environnement alpin possède des spécificités transcendant les frontières ce traité a pour but de coordonner l'action de ses signataires (France, Allemagne, Autriche, Italie, Liechtenstein, Monaco, Slovénie et Suisse) et de l'Union Européenne en matière de développement du massif alpin.

C'est à partir de 2009 que la Convention Alpine se saisit de la question du changement climatique dans les Alpes. Elle définit un plan d'actions décliné en 24 objectifs d'atténuation et d'adaptation. En matière d'adaptation, la Convention Alpine souhaite "promouvoir une approche inté-

grée permettant d'adapter l'espace alpin aux nouvelles conditions climatiques" [[Convention Alpine, 2009](#)]. La Convention Alpine insiste également sur l'objectif de développer la recherche appliquée au niveau local, notamment pour les ressources en eau, ainsi que d'améliorer la sensibilisation du public en matière de changement climatique.

A l'échelle nationale, le plan national d'adaptation au changement climatique possède une fiche action spéciale montagne. Sa mesure phare est d'intégrer dans les schémas de massif un volet d'adaptation au changement climatique. Les schémas de massif ont été instaurés en 2005. Ils permettent de mettre en place une vision à quinze ou vingt ans de l'avenir du massif. Ils doivent être une référence pour les prochains programmes de développement de la montagne (convention interrégionale de massif, fonds communautaires...). Actuellement, ce document stratégique ne traite pas des changements climatiques. C'est pourquoi le PNACC souhaite intégrer cette dimension car l'échelle du massif constitue une échelle cohérente pour des mesures contre le changement climatique.

La Convention interrégionale du massif des Alpes, négociée entre l'Etat et les régions concernées pour 6 ans, évoque succinctement l'adaptation au changement climatique à travers le volet tourisme en souhaitant adapter les investissements touristiques à la nouvelle demande de la clientèle et aux évolutions climatiques prévisibles.

Plus localement, certaines régions prennent l'initiative de sensibiliser les populations et les décideurs politiques par le biais de livrets explicatifs. C'est le cas de la région Rhône-Alpes qui en 2007 a publié 40 pages accompagnées d'un CD-ROM sur comment s'adapter en Rhône-Alpes [[RAEE, 2007](#)]. Cet ouvrage grand public et facile d'accès permet une prise de conscience du problème sans aller très en profondeur dans la mise en œuvre effective de l'adaptation au changement climatique sur le terrain. C'est un premier pas dans une démarche locale.

Au niveau européen, différents projets notamment ceux de l'Espace Alpin ont traité des questions d'adaptation au changement climatique dans plusieurs domaines. Ces programmes européens traitent par exemple de l'adaptation dans l'aménagement du territoire (CLISP), dans le domaine de la gestion des risques naturels (AdaptAlp, PERMANET), de la gestion des ressources (Alp Water Scarce, MANFRED, SILMAS), etc.. Suite à ces projets achevés, de nombreuses recommandations pour la mise en œuvre concrète de l'adaptation au changement climatique ont été élaborées. Un nouveau projet a vu le jour en 2012 pour reprendre et capitaliser les recommandations les plus abouties afin de les installer sur des sites pilotes alpins. Il s'agit du projet C3-Alps qui a en partie porté cette thèse.

### C - III Le projet européen C3-Alps

C3-Alps, signifiant *Capitalisation of Climate Change knowledge in the Alps* (Capitalisation des connaissances sur le changement climatique dans les Alpes), est un projet européen de l'Espace Alpin commencé en janvier 2012 et s'achevant en décembre 2014. Il a financé et a été un des supports de cette thèse.

L'objectif de C3-Alps est de réunir les connaissances générées lors de précédents projets et



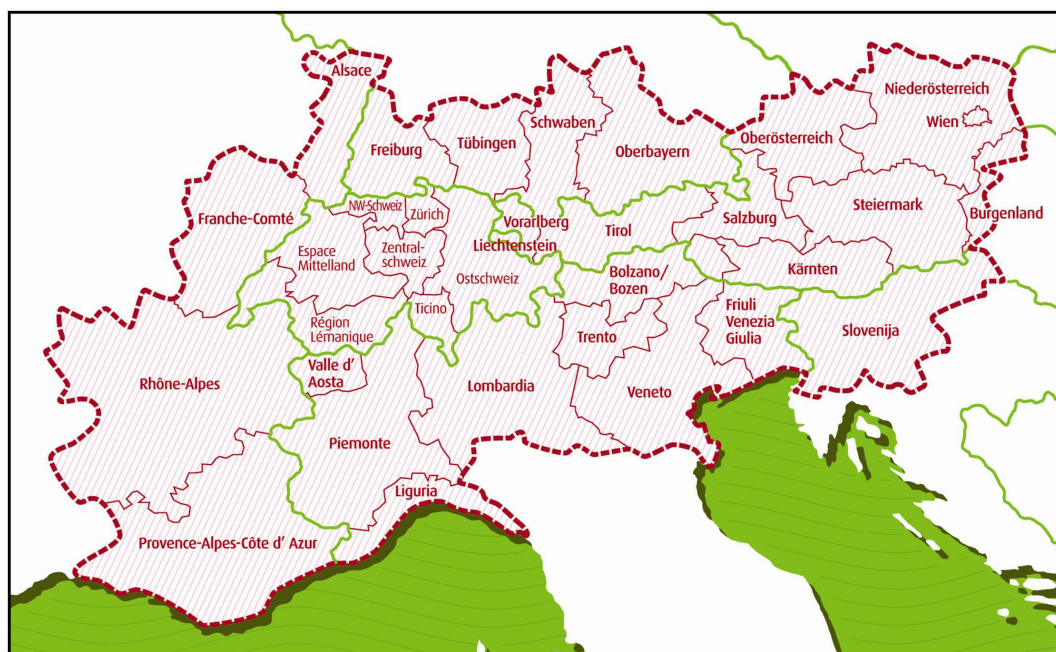


Figure C.5 – Les régions des sept pays de l'Espace Alpin. *Source* : [www.alpine-space.eu](http://www.alpine-space.eu)

de les mettre en place effectivement sur le terrain. C'est ce qu'on appelle la capitalisation. La capitalisation des connaissances a pour but d'identifier, de recueillir et de rendre exploitable le savoir acquis par une organisation [Caussanel et Chouraqui, 1999]. Le projet souhaite contribuer à la mise en œuvre de l'adaptation au changement climatique au niveau juridique et pratique. Il a pour but de transférer les connaissances engrangées lors de précédents projets de l'Espace Alpin pour conduire des actions ciblées au niveau local et régional.

Le projet doté d'un budget de plus de trois millions réunit dix-sept partenaires venant des sept pays de l'Espace Alpin (cf. figure C.5). Il reprend les connaissances les plus abouties générées par dix projets terminés de l'Espace Alpin : CLISP, AdaptAlp, Alp-Water-Scarce, ClimAlpTour, PermaNet, SILMAS, MANFRED, ALP FFIRS, PARAMOUNT et AlpHouse.

Le partenariat regroupe différentes institutions nationales, régionales et locales qui ont mis en place treize sites pilotes dans les différentes régions alpines pour développer des mesures d'adaptation au changement climatique et favoriser le transfert de connaissances envers les acteurs locaux. Résultant de plusieurs programmes de l'Espace Alpin abordant les impacts du changement climatique à travers le prisme de différents secteurs, les sites pilotes touchent à plusieurs domaines tels que le tourisme, la forêt, la gestion de la ressource en eau, etc., mais également à des domaines transversaux comme les politiques d'adaptation, la sensibilisation à l'adaptation au changement climatique.

La France possède deux sites pilotes dans le projet C3-Alps : le département de la Savoie et la commune de Megève. Les deux sites pilotes traitent de l'adaptation au changement climatique dans le domaine de la gestion de l'eau mais l'aborde de manière différente. Au niveau du département, l'objectif est de promouvoir les démarches d'adaptation dans la gestion de la ressource en eau par, en premier lieu, une prise de conscience des problèmes existants sur le territoire,

même s'il est riche en eau. A Megève l'objectif est de mettre en place un outil efficace d'aide à la décision permettant une meilleure gestion de l'eau notamment en intégrant les effets des changements climatiques dans cette gestion. Pendant cette thèse nous étions donc en charge du développement et de la mise en œuvre de ces deux sites pilotes.

Très actif dans d'autres dimensions du projet, nous avons notamment contribué à la mise en place d'une plateforme de l'adaptation, réunissant tous les documents traitant de politiques d'adaptation dans l'Espace Alpin ainsi qu'à la réalisation de synthèses sur le sujet présentées dans la section [H - II](#) page [146](#).

## C - IV Conclusion

Les réponses politiques aux impacts du changement climatique sont de deux ordres, l'atténuation, qui est la réponse historiquement la plus ancienne, et l'adaptation. Fort du constat que l'atténuation ne permettra pas de limiter suffisamment les impacts du changement climatique, les territoires s'engagent de plus en plus dans des démarches d'adaptation pour minimiser autant que possible leurs vulnérabilités face à ces nouveaux enjeux.

L'adaptation au niveau des Alpes est encore souvent à un stade de sensibilisation même si la France est un pays en avance sur ces questions notamment grâce à plusieurs documents législatifs. Au niveau européen, les programmes de mise en place effective de l'adaptation au changement climatique se multiplient, comme le programme C3-Alps par exemple.

A la lecture de ces résultats, il ressort notamment un besoin de développer la recherche appliquée à l'échelle locale et notamment dans le domaine des ressources en eau. L'objectif de ces recherches appliquées doit être de promouvoir une approche intégrée des solutions d'adaptation au changement climatique afin de soutenir les collectivités dans leur développement. Il est nécessaire pour se faire de mieux identifier les impacts économiques et sociaux des changements climatiques au niveau local. La sensibilisation des publics est également toujours nécessaire afin d'intensifier la coopération dans le domaine de l'adaptation au changement climatique.

Dans l'objectif de répondre à ces enjeux, cette thèse présente le développement et les résultats d'un modèle hydro-anthropique innovant permettant une meilleure appréhension des impacts du changement climatique tant au niveau physique que socio-économique. Il a pour objectif de contribuer à développer l'adaptation au changement climatique dans les Alpes en le testant sur Megève. Ce modèle est présenté dans la [Deuxième partie](#) de cette thèse. Puis, une réflexion sur la transmission et la communication de ces résultats vers différents publics, notamment grâce aux interfaces ludiques est développée en [Troisième partie](#).





Deuxième partie

## **Modélisation de la gestion de l'eau en montagne**



---

### Méthodologie : le choix de la modélisation

---

#### D - I Évaluation des besoins

##### D - I - 1 Identification des pénuries

L'objectif de tout gestionnaire de l'eau est de satisfaire les besoins, donc d'anticiper les ressources et les consommations des usages de l'eau de son territoire afin d'éviter les pénuries. D'un point de vue sémantique, trois éléments apparaissent primordiaux dans la définition de la gestion de l'eau : la quantité d'eau naturelle, la quantité d'eau exploitable et la demande en eau.

- L'*eau naturelle* ou *eau du milieu* est la quantité d'eau naturellement présente dans le milieu. Elle est souvent décomposée en plusieurs compartiments : l'eau souterraine, l'eau de surface, l'eau du sol, etc. Cette quantité d'eau naturelle évolue en fonction du climat.
- L'*eau exploitable* est la quantité d'eau que l'on peut extraire du milieu naturel pour la rendre disponible aux usages de l'eau. Elle est fonction des capacités techniques d'extraction et de stockage ainsi que du coût économique de l'extraction.
- La *demande en eau* est la quantité d'eau nécessaire aux usages de l'eau pour fonctionner normalement. Elle est fonction des conditions socio-économiques du territoire.

Une gestion équilibrée et durable de l'eau est assurée lorsque l'eau exploitable est toujours supérieure à la demande en eau et que les besoins du milieu naturel sont respectés. Dans le cas contraire, soit des situations de pénuries peuvent avoir lieu lorsque la demande excède la quantité d'eau exploitable, soit des préjudices peuvent être portés au milieu naturel par la surexploitation des ressources en eau. Ainsi pour une gestion équilibrée et durable ces deux paramètres doivent

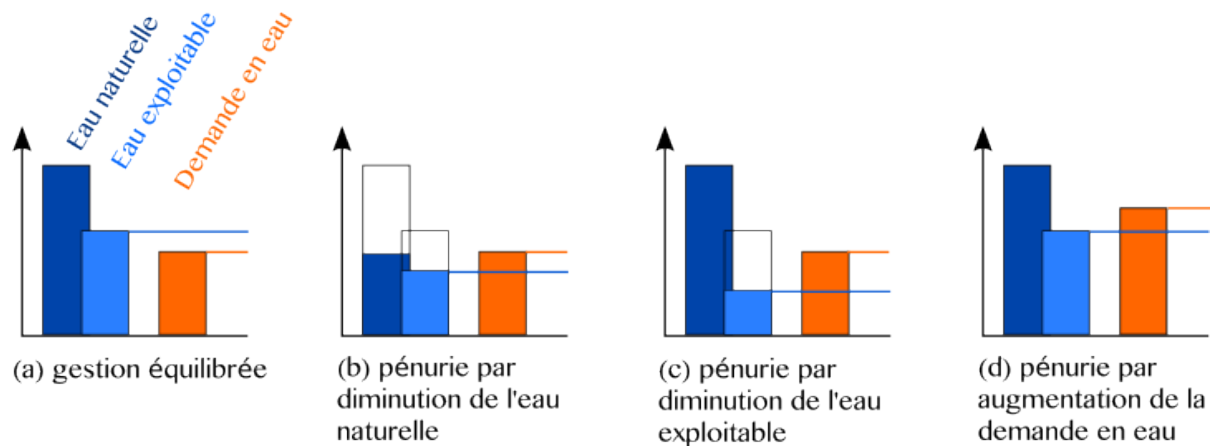


Figure D.1 – Les différentes sources de pénuries d'eau

être pris en compte.

La bonne gestion des quantités d'eau nécessaires au bon état écologique du milieu naturel est définie par la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA)<sup>1</sup>. Ces débits minimaux doivent donc être inclus dans l'outil développé pour une gestion durable de l'eau.

Le cadre légal permettant de définir les débits minimaux, il faut néanmoins que l'outil développé pour la gestion équilibrée et durable de l'eau s'attache à représenter le deuxième paramètre : l'équilibre entre la quantité d'eau exploitable et la demande en eau par les usages. Ainsi la question des pénuries d'eau est un angle intéressant pour traiter cette problématique.

Trois éléments peuvent intervenir dans l'apparition d'une pénurie d'eau (figure D.1) :

- la diminution de la quantité d'eau naturelle du fait des conditions climatiques (e.g. modification des précipitations, augmentation des températures) : cas (b) de la figure D.1
- la diminution de la quantité d'eau exploitable du fait de facteurs techniques (e.g. pompe en panne, pollution d'un réservoir, fuites importantes, etc.), économiques (e.g. trop coûteux d'exploiter telle réserve) ou législatifs (e.g. augmentation des débits naturels réservés : cas (c) de la figure D.1
- l'augmentation de la demande en eau du fait de facteurs socio-économiques (e.g. augmentation de la population, développement touristique) : cas (d) de la figure D.1

En définissant ainsi les différentes sources de pénuries d'eau, on peut percevoir le problème de la gestion de l'eau durable dans le temps. Afin d'atteindre cet objectif, il faut pouvoir suffisamment bien estimer les évolutions climatiques, les évolutions techniques et les évolutions socio-économiques du territoire qui influent sur l'apparition de situations de pénuries d'eau.

1. le débit minimal ou débit réservé doit être égal à 1/10<sup>ème</sup> du module du cours d'eau en aval immédiat de l'ouvrage ou 1/20<sup>ème</sup> du module pour les cours d'eau ayant un module supérieur à 80 m<sup>3</sup>/s et pour les ouvrages hydroélectriques qui contribuent, par leur capacité de modulation, à la production d'électricité en période de pointe de la consommation. Ces valeurs générales sont valables pour des zones où il n'y a pas de fortes pressions sur l'eau. Dans les autres cas, les prélèvements sont régis par des études de volume maximum prélevable *Source* : [www.auvergne.developpement-durable.gouv.fr](http://www.auvergne.developpement-durable.gouv.fr)

## D - I - 2 Gestion du partage des usages de l'eau

Le développement d'un outil aidant à la gestion durable des ressources en eau doit pouvoir suffisamment bien définir les différents usages de l'eau et leurs caractéristiques. Le calcul des consommations propres à chaque usage via des paramètres clés évoluant en fonction de la période de l'année est la base de cette définition des usages de l'eau. Néanmoins le calcul précis de la consommation de chaque usage ne suffit pas à représenter la réalité du fonctionnement du partage des usages de l'eau. Il faut également être en mesure de reproduire des règles de gestion qui régissent chaque territoire.

L'outil doit pouvoir rendre compte de la législation (e.g. priorité à l'eau potable) et de son évolution (e.g. modification des débits réservés) ainsi que des choix économiques plus ou moins explicites de la zone étudiée. Prenons l'exemple d'une station de ski de moyenne montagne ayant une centrale hydroélectrique. Celle-ci préférera sûrement, si elle n'a pas la capacité de répondre à tous les usages de l'eau, produire de la neige artificielle en période hivernale plutôt que de produire de l'hydroélectricité car le tourisme est une priorité économique pour ce territoire. Une autre municipalité pourrait choisir un développement différent et favoriser l'hydroélectricité. Ces choix influencent la gestion des ressources et doivent donc pouvoir être pris en considération. Si pour l'instant l'hydroélectricité n'est pas une priorité pour ces communes, les objectifs liés à la transition énergétique et les économies financières que représentent l'exploitation hydroélectrique pourrait modifier cela [[Tenevia, 2014](#)]. A travers cet exemple trivial l'importance de l'évolution des choix socio-économiques est notable. Ainsi l'outil développé doit permettre de prendre en compte ces évolutions possibles.

Un autre paramètre clé dans la reproduction de la gestion du partage de la ressource est l'organisation du réseau d'adduction d'eau. En effet, la connaissance du réseau d'eau est essentielle pour bien déterminer la possibilité d'un usage de prélever ou non son besoin en eau. Par exemple, un réservoir d'eau potable ne sera peut-être pas utilisé pour la neige de culture. Ainsi, même si ce réservoir est plein, l'usage neige de culture ne pourra pas forcément être satisfait.

La connaissance du réseau d'eau permet également de faire le lien avec le milieu naturel. Les débits maximums prélevables transitant dans des conduites de tailles définies doivent ainsi être déterminés pour quantifier la quantité d'eau exploitable. Enfin, la prise en compte du réseau permettrait dans un outil de gestion durable de l'eau de considérer les pertes du réseau, qui atteignent en moyenne 25% en France et jusqu'à 40% par endroit<sup>2</sup>. L'impact d'une amélioration du réseau pourrait ainsi être potentiellement quantifié.

Pour résumé, un outil voulant représenter la gestion du partage de l'eau doit être en mesure de représenter :

- les ressources en eau naturelles du milieu
- les consommations de chaque usage
- les règles de gestion propres à chaque territoire
- le réseau d'adduction d'eau

---

2. [www.developpement-durable.gouv.fr/](http://www.developpement-durable.gouv.fr/)

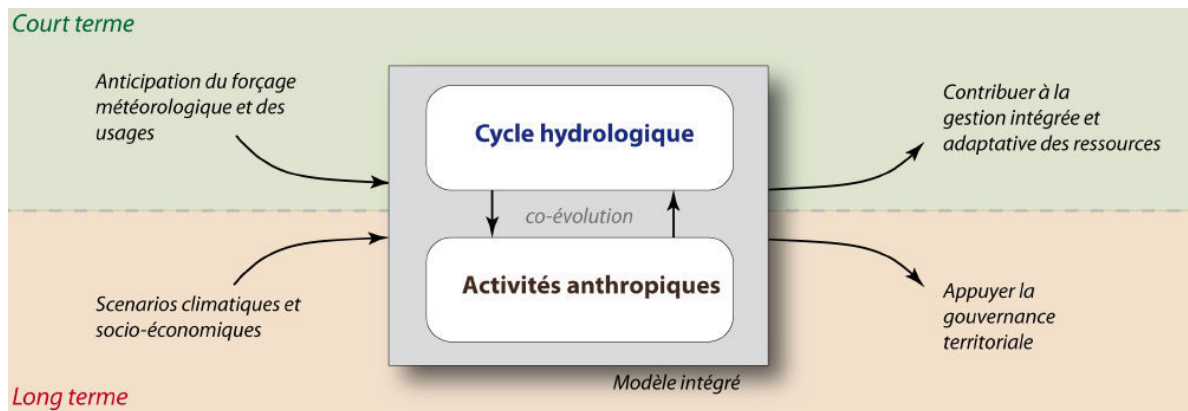


Figure D.2 – Différentes échelles temporelles à prendre en compte dans l’outil de gestion durable des ressources en eau en fonction des actions souhaitées (gestion de crises, plans d’adaptation aux changements climatiques, etc.). *Source* : William Castaings 2012, communication personnelle

### D - I - 3 Prévisions des évolutions futures

La notion de durabilité de la gestion de l’eau implique nécessairement une dimension temporelle. Jusqu’à quel horizon la planification de la gestion doit-elle être durable ? 5 ans ? 10 ans ? 20 ans ? 100 ans ? De même, jusqu’à quel horizon temporel sommes-nous en mesure d’apporter des réponses crédibles ?

Un outil d’aide à la décision pour une gestion durable de l’eau doit être en mesure de pouvoir prendre en compte les évolutions futures d’un territoire. Cette prévision doit se faire sur deux axes : des prévisions d’évolution des quantités d’eau futures sur le territoire liées aux conditions climatiques et des prévisions sur les capacités d’exploitation et les consommations futures liées aux conditions socio-économiques du territoire.

Selon l’objectif de l’outil, les prévisions doivent être à court ou long terme. Les prévisions à court terme doivent permettre d’anticiper les risques d’émergence de pénurie dans les semaines à venir en incorporant les conditions météorologiques et les prévisions de consommations à venir. Les prévisions à long terme doivent permettre de représenter les grandes tendances de fond d’évolution du territoire en prenant en compte les effets des changements climatiques et les choix de développement du territoire.

Des prévisions sont par nature incertaines. Il n’est pas possible d’obtenir 100% de certitude sur ce que seront les conditions futures même à court terme. Ainsi, l’outil doit être en mesure d’interpréter des scénarios différents que se soit des scénarios climatiques ou socio-économiques.

Afin de promouvoir une gestion durable de l’eau grâce à un outil, ce dernier doit donc être en mesure de gérer plusieurs échelles temporelles de prévisions ainsi que plusieurs scénarios climatiques et socio-économiques (*cf.* figure D.2).

#### D - I - 4 Stratégies d'adaptation aux changements climatiques

La finalité de construire un outil permettant d'améliorer la gestion durable de l'eau est de participer à la définition de stratégies d'adaptation aux changements climatiques. Pour ce faire, il doit être en mesure d'évaluer l'influence des changements climatiques et des politiques de développement d'un territoire.

L'organisation de l'outil doit donc être suffisamment flexible pour permettre de modifier de nombreux paramètres voués à évoluer. L'exemple cité précédemment des réseaux d'adduction d'eau illustre bien cette nécessité. Le gestionnaire peut vouloir savoir si l'investissement dans l'amélioration de l'efficacité de son réseau peut suffire à compenser les impacts des changements climatiques par exemple. De même, la construction de nouvelles réserves (retenues colinaires, réservoirs, etc.) peut-elle apporter une solution à l'apparition de pénuries d'eau ?

Outre des solutions d'adaptation purement techniques, l'outil doit également être en mesure d'évaluer des stratégies d'adaptation plus générales. Par exemple, au vu des évolutions climatiques, le développement d'activités touristiques d'inter saisons (automne, printemps) pour des stations de ski de moyenne montagne peut-il représenter une solution viable ?

Pour conclure, la construction d'un outil capable de bien représenter le partage de la ressource en eau, ses évolutions futures et de tester des stratégies d'adaptation aux changements climatiques, nécessite la prise en compte de nombreux paramètres qui interagissent ensemble. La solution la plus adéquate pour traiter ce problème semble donc être l'utilisation d'un modèle. Le modèle a pour objectif de représenter le fonctionnement du territoire étudié. Dans notre cas, un modèle aura pour objectif de prédire les pénuries d'eau et devra être en mesure de répondre aux interrogations présentées ci-dessus.

### D - II Le choix d'un modèle pour éviter les pénuries d'eau et explorer les stratégies d'adaptation

#### D - II - 1 Un modèle qu'est-ce que c'est ?

La notion de modèle est présente dans de nombreux domaines scientifiques et peut référer à d'innombrables méthodologies. La notion commune au terme de modèle est celle de représentation. Un modèle doit permettre de représenter, une action, un phénomène, des caractéristiques, etc., de l'objet étudié.

Dans le domaine de la gestion de l'eau, on utilise des modèles hydrologiques, qui sont des modèles numériques (*i.e.* logiciels). Très schématiquement, un modèle numérique est constitué d'une machinerie interne représentant les différentes hypothèses de fonctionnement du bassin versant (boîte orange de la figure D.3). Des données d'entrées sont utilisées pour "forcer" la machinerie interne et fournir des pronostics. Les pronostics dépendent donc des données d'entrées (forçages) et des hypothèses de fonctionnement utilisées.



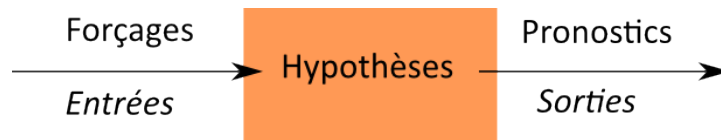


Figure D.3 – Fonctionnement basique d'un modèle numérique

Un modèle hydrologique est donc une traduction algorithmique d'une interprétation de la manière dont les écoulements d'eau se comportent sur un territoire donné [Michon, 2015]. Pour illustrer les différents éléments décrits dans la figure D.3, les entrées ou forçages d'un modèle hydrologique peuvent être les conditions météorologiques (précipitations et températures) qui vont permettre de calculer les débits dans les rivières (pronostics) en fonction de différentes hypothèses du fonctionnement du bassin versant, comme la conductivité hydraulique du sol, la topographie, etc.

La notion d'interprétation est inhérente à chaque modèle. Du fait même d'être une représentation de la réalité, celle-ci est sujette aux interprétations du concepteur du modèle. Il convient donc dans la description des modèles d'explicitier les choix et les hypothèses ayant conduit aux interprétations du concepteur.

## D - II - 2 Intérêt de l'utilisation d'un modèle pour l'adaptation aux changements climatiques dans le domaine de la gestion de l'eau

Un modèle hydrologique s'avère très utile lorsqu'il n'y a pas assez d'informations sur un territoire pour estimer de manière satisfaisante la quantité d'eau à un instant donné. Or, dans les milieux de montagne, il existe une réelle difficulté à recueillir des données sur les précipitations, les débits, etc. [Gottardi et al., 2008]. Dans le domaine de la gestion de l'eau, la connaissance de la quantité d'eau naturelle est primordiale. Un modèle hydrologique en représentant les processus ayant lieu sur le territoire, permet d'estimer en tout point du bassin versant cette quantité d'eau en fonction des précipitations et des températures. Ainsi un modèle hydrologique permet de compenser l'absence de données insuffisamment spatialisées ou insuffisamment robustes.

Cette capacité d'interpolation spatiale est couplée avec une capacité d'interpolation temporelle. Il est ainsi possible de connaître les débits à différents pas de temps. Par exemple, si l'instrumentation sur le terrain mesurant des débits fournit une indication en  $\text{m}^3/\text{j}$ , un modèle hydrologique selon la manière dont il est conçu pourra calculer les débits en  $\text{m}^3/\text{h}$  en différents points du bassin versant. Cette capacité permet d'explorer les pas de temps les plus intéressants pour une gestion de l'eau opérationnelle ou sur des tendances plus longues. La qualité des données par pas de temps dépend de la qualité des forçages et des hypothèses opérées pour le modèle.

Une autre grande utilité de l'utilisation de modèles dans le domaine de la gestion de l'eau est la possibilité d'extrapolation. L'extrapolation temporelle par exemple permet en modifiant les données climatiques d'entrées de simuler les changements climatiques sur le territoire étudié. Ainsi, il est possible d'observer les impacts de ces changements sur la quantité future de la ressource en eau. Puisqu'il existe une incertitude sur l'ampleur des changements climatiques,

le modèle permet de tester plusieurs scénarios climatiques et ainsi de fournir une fourchette d'incertitudes sur les débits naturels futurs.

Les capacités d'extrapolation d'un modèle peuvent également être exploitées pour explorer les évolutions socio-économiques. Les modifications socio-économiques influencent la demande en eau et la quantité d'eau exploitable. Différents plans de développement peuvent être testés pour observer leurs impacts sur la ressource en eau future et l'émergence de pénuries d'eau et donc par voie de conséquence observer leur faisabilité.

Les possibilités d'extrapolation d'un modèle semblent donc particulièrement adaptées au contexte de changements. Un modèle peut donc constituer un bon outil d'adaptation aux changements climatiques dans le domaine de la gestion de l'eau.

### D - II - 3 Les différents types de modèles existants sur cette thématique

L'utilisation d'un modèle pour explorer les stratégies d'adaptation aux changements climatiques pour la gestion de l'eau semble être une solution efficace (*cf.* section précédente). Dans le domaine de la gestion des ressources en eau, il existe déjà de nombreux modèles qui ont cherché à coupler le milieu naturel et le milieu socio-économique pour répondre à cette problématique.

L'utilisation de modèles pour résoudre des problématiques de gestion de l'eau est ancienne. Les premières traces d'analyses de systèmes s'apparentant à un couplage entre milieu naturel et consommation anthropique remontent aux années 1960 [Harou et al., 2009]. A cette époque, certains chercheurs ou ingénieurs cherchent à lier économie et ingénierie de l'eau pour tendre vers une meilleure optimisation de gestion. C'est la naissance des premiers modèles hydro-économiques. Les modèles hydro-économiques tiennent compte des interactions entre le domaine hydrologique (*i.e.* l'environnement naturel) et le domaine économique (*i.e.* l'environnement anthropisé). Ces interactions fonctionnent dans deux sens : l'eau est transformée à des fins économiques pour les usages du territoire, en conséquence, les usages économiques de l'eau influencent la disponibilité et la qualité de l'eau sur le court et le long terme [Brouwer et Hofkes, 2008]. Il existe un vocabulaire varié pour définir les modèles représentant le milieu hydrologique et la sphère anthropique. Ainsi les termes de modèles hydrologique-économique, hydroéconomique, institutionnels, ingénierie économique, hydro-sociologie, offres et demandes, hydroéconomique intégrée, etc. sont parfois utilisés pour décrire cette volonté de coupler dans un même outil hydrologie et conditions socio-économiques. Pour certains, un modèle hydroéconomique doit poser la valeur de l'eau comme cœur de calcul du modèle [Harou et al., 2009] et comme moteur principal d'allocation d'eau aux différents usages. Dans cette thèse, le terme de modèle *hydro-économique* sera utilisé simplement pour définir un type de modèle résolvant à la fois des questions purement hydrologiques associées au milieu naturel et des questions socio-économiques associées à l'utilisation anthropique de l'eau pour tendre vers une meilleure gestion de l'eau du territoire. On se référera à l'étude de [Harou et al., 2009] pour une revue bibliographique sur les modèles hydro-économiques.

Parmi les modèles hydro-économiques il existe différentes approches qui peuvent se combiner. La sémantique n'est pas toujours la même d'un article à l'autre. Aussi nous présentons ici les grandes différences entre chaque approche ainsi que les termes les plus courants employés pour

s'y référer.

Dans un premier lieu, on distingue les approches modulaires, aussi appelées approches couplées, des approches holistiques également appelées approches intégrées. Dans l'approche modulaire, une connexion est effectuée entre le modèle hydrologique et le modèle économique. Les deux modèles fonctionnent séparément (par modules) mais les pronostics du modèle hydrologique sont utilisés pour forcer le modèle économique et *vice-versa*. Dans l'approche holistique, un seul modèle intégrant l'ensemble des paramètres naturels et physiques est constitué. L'ensemble des variables est résolu dans un même système d'équation [[Brouwer et Hofkes, 2008](#)].

La deuxième distinction entre des modèles hydro-économiques est celle de simulation ou d'allocation (également appelée optimisation). Un modèle de simulation cherche à répondre à la question "que se passe-t-il si ?". Ces modèles simulent les décisions à un pas de temps itératif. Des règles codifient les régulations opérationnelles, légales et institutionnelles. Les modèles de simulation reproduisent les décisions d'attribution de l'eau en accord avec les pratiques de gestion existantes.

Les modèles d'allocation cherchent quant à eux à optimiser l'allocation des ressources et donc à maximiser la satisfaction de la demande [[Condon et Maxwell, 2013](#)] sans forcément suivre de règles directement applicables. Le choix de simplifier ou d'outrepasser des règles opérationnelles existantes permet de mieux explorer le potentiel physique et économique du système pour en proposer des améliorations.

[Brouwer et Hofkes \[2008\]](#) mettent en évidence les principales limitations des modèles hydro-économiques. La première repose sur le fait que les modèles hydrologiques utilisés pour représenter le fonctionnement naturel des ressources en eau sont souvent basés sur des techniques de simulation alors que les modèles économiques sont souvent basés sur des techniques d'allocation. De même les échelles géographiques sont distinctes. Un modèle hydrologique se base sur une unité géographiquement cohérente comme le bassin versant alors que les modèles économiques s'appuient souvent sur des territoires administratifs (communes, département, etc.) qui ne correspondent pas forcément à la réalité hydrologique. Enfin les échelles de temps sont différentes. Les modèles hydrologiques fonctionnant sur des temps plutôt courts de l'ordre de l'horaire, du journalier, du mensuel ou au maximum de la saison alors que les modèles économiques sont souvent sur des temps plus longs.

[Brouwer et Hofkes \[2008\]](#) pensent que la modélisation des effets réciproques entre les changements du système hydrologique sur le système économique et *vice-versa* des effets des changements économiques sur le système hydrologique est un des challenges majeurs de ce domaine des modélisations hydro-économiques. Pareillement [Condon et Maxwell \[2013\]](#) affirment que la plupart des modèles de simulation ne parviennent pas à simuler de manière satisfaisante des décisions de gestion de l'eau.

C'est dans ces interrogations que le modèle développé dans cette thèse s'inscrit. S'il ne chiffre pas les impacts économiques à proprement parler de l'allocation d'eau, le modèle développé s'insère parfaitement dans le domaine des modèles de simulation hydro-économiques avec l'objectif de développer un outil de gestion interactif entre le milieu naturel et l'environnement socio-économique. Néanmoins, il sera également possible d'utiliser le modèle développé comme un

modèle d'optimisation de l'allocation des ressources en eau. Si la démonstration du potentiel d'optimisation du modèle développé n'a pas été effectuée dans cette thèse, la construction du modèle, présentée dans le chapitre E permet tout à fait cette possibilité.

#### D - II - 4 Quelques exemples d'utilisation des modèles pour la gestion durable de l'eau en milieu de montagne

Récemment, les questions d'adaptation aux changements climatiques sont de plus en plus étudiées (cf. chapitre C). Il en est de même sur les territoires de montagne particulièrement exposés aux changements climatiques (cf. chapitre B). Trois projets récents traitant de ces problématiques en ayant recours à la modélisation sont brièvement présentés ci-dessous.

##### Vulcain

Le projet Vulcain<sup>3</sup> du BRGM achevé en 2009 (financé par l'Agence Nationale de la Recherche) a étudié la vulnérabilité des hydrosystèmes face aux changements climatiques dans la zone Méditerranéenne et en particulier dans le département des Pyrénées Orientales. L'objectif était de mettre en place une modélisation intégrée et transdisciplinaire qui permette d'étudier les impacts des changements climatiques et des changements socio-économiques sur les hydrosystèmes méditerranéens à court terme (2020-2040) et à long terme (2040-2060)<sup>4</sup>. Trois bassins versants d'environ 1000 km<sup>2</sup> alimentant un aquifère multi-couches très exploité par l'irrigation et l'alimentation en eau potable ont été étudiés. Le résumé réalisé ici se base sur le rapport scientifique du projet [BRGM, 2011].

Pour les scénarios climatiques, le projet Vulcain a utilisé la méthode des perturbations pour générer des scénarios climatiques à court terme à partir des données climatiques actuelles enregistrées sur les sites d'études. Les scénarios du GIEC [IPCC, 2007] ont été utilisés pour les projections à long terme.

Du point de vue socio-économique, des modèles ont été réalisés pour deux paramètres : la consommation en eau potable et la consommation pour l'agriculture (irrigation). Ces modèles permettent d'estimer la part du prélèvement qui retourne dans les cours d'eau ou les aquifères. Ils permettent également de calculer la demande en eau future à partir de scénarios socio-économiques prospectifs construits dans des ateliers associant les acteurs du territoire.

Les modèles de consommations en eau sont ensuite intégrés dans un modèle hydrologique auquel sont ensuite appliqués les scénarios climatiques décrits précédemment. Enfin, une modélisation ponctuelle de la piézométrie a également été réalisée au cours de ce projet. L'analyse entre les besoins futurs en eau et les quantités d'eau disponibles à travers un modèle intégré permet de mettre en évidence la vulnérabilité ou non de la zone étudiée à différentes échelles temporelles.

Le projet Vulcain a permis de mettre en évidence la grande vulnérabilité des Pyrénées orientales

---

3. vulnérabilité des hydrosystèmes soumis au changement global en zone méditerranéenne

4. [www.brgm.fr/projets/vulcain-vulnerabilite-hydrosystemes-soumis-changement-global-zone-mediterraneenne](http://www.brgm.fr/projets/vulcain-vulnerabilite-hydrosystemes-soumis-changement-global-zone-mediterraneenne)

à court terme face aux impacts du changement climatique. Les mesures stratégiques prises actuellement ne seront pas suffisantes pour faire face à ces évolutions et de nouveaux engagements et réflexions sont nécessaires pour ce territoire.

Du point de vue de notre problématique, le projet Vulcain illustre l'intérêt de coupler scénarios socio-économiques et scénarios climatiques afin de dégager les tendances à venir. Dans une présentation de synthèse du projet [Caballero \[2011\]](#) insistait sur la nécessité d'étude au cas par cas de la situation et ce au moins à l'échelle saisonnière. En effet le modèle développé dans Vulcain du fait de la taille du bassin versant étudié ainsi que de la nature des modèles développés ne permet pas une utilisation de ce dernier pour rechercher et tester l'impact de différentes solutions d'adaptation. Les modèles développés permettent néanmoins de mettre en évidence les risques et les vulnérabilités intenses des territoires étudiés face aux changements climatiques.

## ACQWA

Le projet ACQWA<sup>5</sup>, financé par le 7<sup>ème</sup> programme-cadre de l'Union Européenne pour la recherche et le développement (FP7), a démarré en octobre 2008 pour une période de 5 ans. L'objectif était d'utiliser des outils de modélisation pour quantifier l'influence du changement climatique sur les principaux paramètres influençant les débits des rivières et d'analyser leurs impacts sur la société et l'économie. Le projet était focalisé sur les zones de montagne où la neige et la glace représentent un important contributeur aux débits de rivières<sup>6</sup>.

Le projet ACQWA était un projet conséquent avec trente-cinq partenaires provenant de dix pays différents. Les études menées ont touché à plusieurs domaines allant de la descente d'échelle de modèle, à l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur différents secteurs d'activité en passant par des recommandations pour le développement de politiques d'adaptation. Le document [[ACQWA, 2013](#)] résume les principaux résultats de ce projet.

En ce qui concerne le développement de modèles hydro-économique couplés ou intégrés, il ne semble pas que le projet ACQWA ait réalisé des avancées majeures dans ce domaine. Le projet a développé et amélioré des modèles climatiques et leurs scénarios qu'il a appliqué à des modèles hydrologiques. L'analyse des résultats a permis de mettre en perspective les vulnérabilités liés à certains secteurs d'activité de montagnes (hydroélectricité, tourisme, agriculture, etc.) et de préconiser des politiques d'adaptation à ces impacts.

Dans sa conclusion, le projet ACQWA met en évidence le besoin pour une recherche plus intégrée et plus compréhensive des besoins en eau et de leur gestion. Le problème de l'inconsistance entre les données économiques et les données hydrologiques notamment du point de vue de la temporalité et de la spatialité est évoqué. Ce problème semble être une limitation dans la conception de modèles hydro-économiques (évoqué page 57). Enfin le projet ACQWA conclut sur les difficultés de compréhension entre le monde de la Science et le monde Politique, sous-entendu sur l'intégration de résultats scientifiques pertinents dans le développement et l'application de politiques en faveur de la gestion intégrée de l'eau et de l'adaptation aux changements climatiques.

---

5. Assessing Climate Impacts on Quality and Quantity

6. [www.acqwa.ch](http://www.acqwa.ch)

L'expérience du projet ACQWA montre la difficile communication des résultats scientifiques pouvant servir aux développements de stratégies politiques efficaces pour les défis à venir. Dans cette thèse nous interrogeons cette question dans la [Troisième partie](#).

## MontanAqua

Le projet MontanAqua s'est développé sur une période de 3 ans entre 2010 et 2014. Il faisait partie d'un projet plus large sur la gestion durable de l'eau en Suisse dénommé PNR 61 et financé par le Fond National de la recherche Scientifique. L'objectif de MontanAqua est d'anticiper le stress hydrique dans les Alpes et d'étudier des scénarios de gestion de l'eau dans la région de Sierre-Crans-Montana dans le Valais Suisse pour proposer des stratégies de gestion durable de l'eau.

Pour se faire, le projet s'organise en trois dimensions distinctes (figure [D.4](#)) :

- l'évaluation des ressources en eau actuelle et future (horizon 2050), notamment grâce à la modélisation
- le diagnostic des usages de l'eau actuels et futurs (horizon 2050) à l'aide de la définition de scénarios socio-économiques distincts en partie en collaboration avec les acteurs du territoire. Ce diagnostic et la réalisation des quatre scénarios socio-économiques sont présentés en détail dans la thèse de [Bonriposi \[2013\]](#)
- l'étude des structures socio-économiques de gestion de l'eau actuelles afin de définir les coûts et les opportunités pour des stratégies d'adaptation possibles de demain.

Chaque dimension doit servir à alimenter la réflexion autour du développement de stratégies d'adaptation mais il n'y a pas d'incorporation de tous ces éléments dans un seul modèle. L'étude des ressources en eau permet d'évaluer la quantité actuelle et future d'eau donc l'offre disponible. L'étude des usages de l'eau permet de calculer la demande. Enfin l'étude des structures socio-économiques permet d'évaluer le coût financier et politique de développement de stratégies d'adaptation. Cette démarche poussée permet d'imaginer jusqu'à l'implantation géographique future des usages de l'eau. Cela permet d'impliquer potentiellement de façon intense les citoyens, les gestionnaires et les politiques, ce qui est essentiel dans ce domaine.

L'objectif de notre travail est sensiblement différent. Il ne cherche pas à atteindre ce niveau de précisions. Notre recherche souhaite plutôt quantifier l'évolution temporelle des ressources en eau effectivement disponibles, pour différents scénarios socio-économiques, dont ceux construits par exemple avec la méthodologie de MontanAqua. En d'autres termes notre recherche cherche à définir le champ des possibles plutôt que d'analyser précisément certains d'entre eux.

Les résultats de MontanAqua présentés par [Reynard et al. \[2013\]](#) montrent que l'impact sur les ressources en eau des choix de développement socio-économiques est plus importants que l'impact du changement climatique dans la région du Valais Suisse. Il y a donc un enjeu certain à modéliser correctement les interactions entre prélèvements et ressources ainsi que leurs évolutions futures.

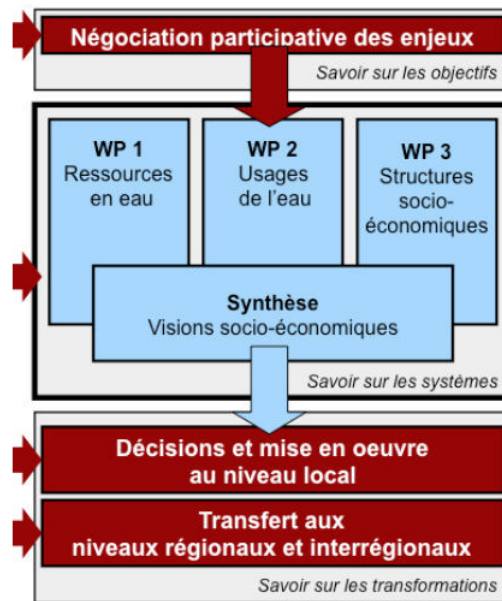


Figure D.4 – Organisation du projet MontanAqua. Source : [Reynard et al. \[2013\]](#)

## D - III Conclusion

L'analyse des besoins pour une gestion durable de l'eau fait apparaître la nécessité de représenter à la fois les ressources en eaux naturelles disponibles sur le territoire et les utilisations socio-économiques qui en sont faites. Ces deux dimensions doivent être décrites actuellement afin de dresser un état des lieux de la situation et dans le futur pour anticiper les risques de crises et de pénuries. Comme le futur est incertain, l'outil développé doit être en mesure d'accepter plusieurs scénarios possibles à la fois climatiques et socio-économiques. C'est pourquoi le développement d'un modèle autorisant l'implémentation de différents scénarios et l'interaction entre activités socio-économiques et ressources naturelles a été choisi pour interroger cette problématique.

Cette démarche s'ancrant dans le monde des modèles hydro-économiques est le reflet d'une préoccupation de plus en plus importante envers la durabilité de la gestion de l'eau en montagne. Les nombreux projets développés ces dernières années sur cette problématique témoignent de la préoccupation grandissante liée à ces problématiques tant au niveau européen que national et local. Ainsi, il est également mis en évidence l'importance de développer un outil pouvant être utilisé par les acteurs du territoire pour la mise en œuvre directe et concrète des résultats dans le développement de stratégies d'adaptation aux changements climatiques.

Le modèle développé pendant cette thèse cherche à répondre à ces problématiques. Son fonctionnement est présenté dans le chapitre E et son application à la municipalité de Megève dans le chapitre F. Enfin une mise en perspective des résultats du modèle par rapport aux problématiques soulevées ici est effectuée dans le chapitre G.

---

### Fonctionnement du modèle couplé

---

Le chapitre D montre la nécessité de représenter à la fois le milieu naturel et le milieu anthropique pour permettre la promotion d'une gestion durable des ressources en eau dans un contexte de changement climatique. Le modèle développé au cours de cette thèse s'inscrit dans cette nécessité. Ce dernier est constitué de deux modules (*cf.* figure E.1) :

- un module hydrologique représentant les caractéristiques du milieu naturel sans présence humaine
- un module anthropique représentant les activités humaines sur le bassin versant

Les pronostics du module hydrologique (*i.e.* les quantités d'eau en chaque point du bassin versant) servent de forçages au module anthropique qui à son tour force le module hydrologique. Il s'agit donc d'un couplage dynamique. Le dialogue des deux modules permet de fournir à chaque pas de temps les quantités d'eau dans les réservoirs artificiels, dans le milieu naturel ainsi que le niveau de satisfaction des usages de l'eau sur le territoire étudié. L'ensemble des pronostics établis par le modèle développé ainsi que les hypothèses permettant d'y aboutir seront présentés dans ce chapitre. La combinaison d'un module hydrologique et d'un module anthropique dans le modèle développé doit permettre de mesurer à la fois l'impact des changements climatiques et l'impact des modifications socio-économiques sur les ressources en eau et sur l'économie du territoire étudié. Ce modèle cherche donc à répondre aux besoins formulés dans la section D - I pour l'adaptation aux changements climatiques.



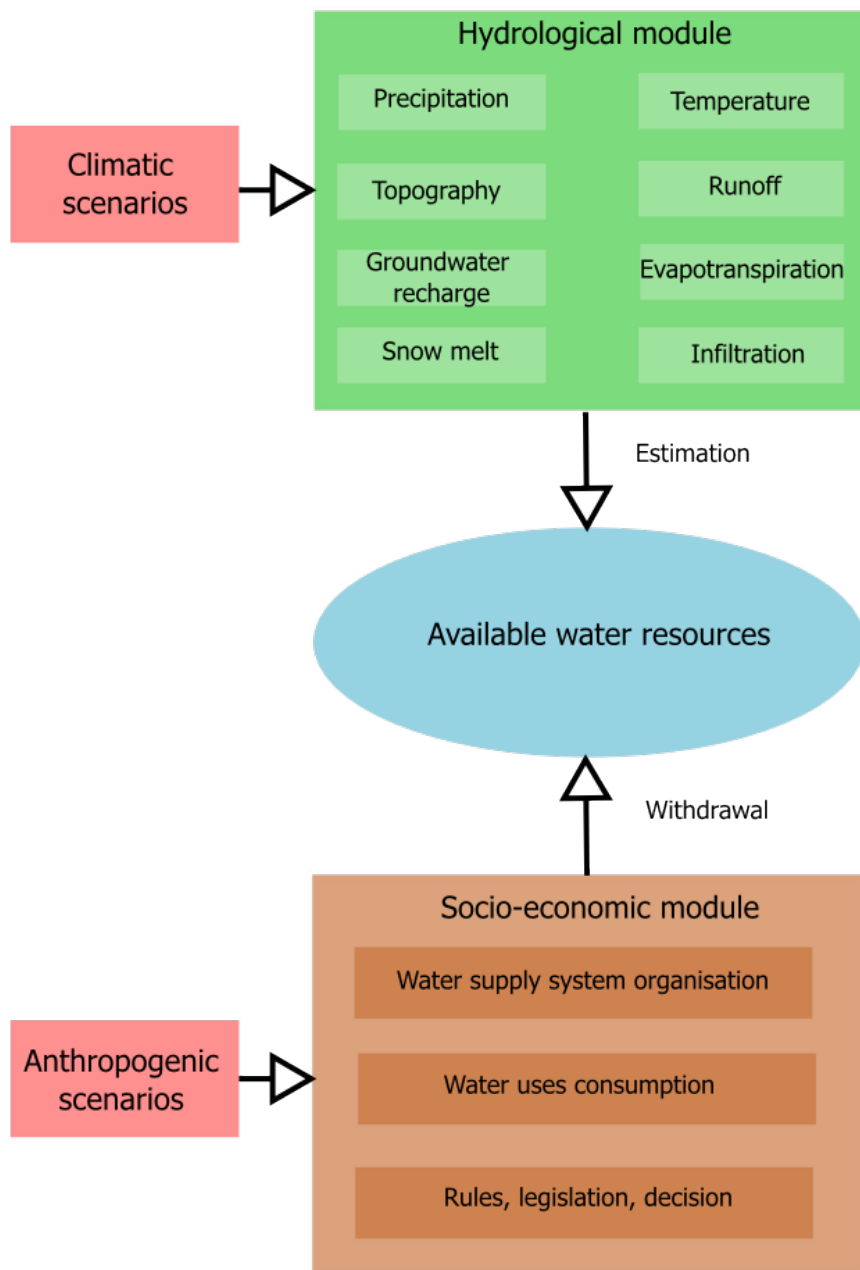


Figure E.1 – Organisation schématique du modèle couplé. *Source* : Eve Leroy, C3-Alps 2014

## E - I Le concept du modèle couplé

De part son organisation, le modèle s'inscrit dans le domaine des modèles hydro-économiques dits *modulaires* ou *couplés* de *simulation* (cf. section D - II , page 53). Néanmoins, il sera possible de l'utiliser également en optimisation. Même si cette démarche n'a pas été démontrée dans cette thèse, elle est présentée dans le chapitre perspective (chapitre G, page 119). La figure D.2 page 52 représente bien le concept du modèle développé : un cœur constitué de deux modules (hydrologique et anthropique) en co-évolution.

Le modèle est codé en langage informatique Java, ce qui lui permet d'être utilisé sur différentes plateformes (Mac, Windows, Linux, etc.), mais avant tout l'approche modulaire et orientée objet d'un tel langage informatique présente de nombreux avantages pour notre recherche. Par exemple, l'approche modulaire permet d'apporter des modifications séparément au module hydrologique et/ou au module anthropique. Ainsi l'amélioration des connaissances dans un domaine peut être directement intégrée sans remettre en cause l'intégralité de l'architecture globale. Par exemple si les modèles hydrologiques améliorent leurs pronostics grâce à une avancée majeure dans ce domaine, il sera possible d'intégrer facilement cette avancée au modèle développé sans influencer le reste de son fonctionnement.

De même le langage orienté-objet établit une construction du code par objets que l'on peut assimiler à des guichets d'informations. Un objet, tout comme un guichet d'information, a pour fonction de répondre à une ou plusieurs questions. L'objectif est de répondre à la question correctement peu importe la manière dont l'information a été établie. En suivant l'analogie du guichet d'informations si l'on souhaite savoir quelle ligne de tram prendre pour aller d'un point A à un point B, peu importe que le guichetier ait consulté un annuaire, utilisé internet ou demandé à son voisin, l'important est qu'il donne à chaque fois la bonne réponse à la question posée. C'est là la grande force du langage orienté-objet. Par exemple, pour un objet agriculture, la fonction de l'objet est de répondre à "Quel est mon besoin en eau?". Grâce à ses caractéristiques et à des méthodes de calcul propres à l'objet agriculture, celui-ci répondra à la question posée. Les méthodes peuvent être basiques (e.g. le nombre de vaches  $\times$  consommation d'une vache) ou très complexes (e.g. modèle de demande en eau de l'irrigation), elles répondront toujours à la question "Quelle est mon besoin en eau?". Un objet peut faire appel à d'autres objets ayant eux-mêmes leurs méthodes, pour répondre à sa question initiale (e.g. un objet bassin versant devant répondre à la question "Combien ai-je d'eau disponible à mon exutoire?" fait appel à de nombreux objets contenant eux-mêmes des méthodes complexes).

Cette approche orientée-objet permet au-delà de cette thèse, de continuer à faire évoluer cette première construction au gré des progrès dans notre connaissance et notre représentation du fonctionnement naturel des bassins versants de montagne (domaines disciplinaires de l'hydrologie, la climatologie, la météorologie, etc.). Également cette construction autorise la prise en compte continue de progrès dans la représentation des prélèvements de la ressource en eau (fonctionnement des réseaux d'adduction d'eau) mais également législative (changement des contraintes légales sur l'utilisation de l'eau). Le choix numérique effectué dans cette thèse offre un moyen souple d'intégrer les différentes communautés de chercheurs en sciences de l'environnement. Nous verrons dans la [Troisième partie](#) que ce choix méthodologique permet également

d'intégrer les sciences humaines et sociales dès à présent et dans l'avenir.

Dans ce chapitre, le fonctionnement du module hydrologique sera explicité puis celui du module anthropique. Les différentes possibilités d'utilisation du modèle développé seront présentées en fin de chapitre.

## E - II Le module hydrologique : représente le milieu naturel

Le module hydrologique a pour objectif de représenter la quantité d'eau naturelle présente dans le bassin versant à un instant donné. Le module hydrologique représente donc le fonctionnement du milieu naturel vis-à-vis des ressources en eau. Il est constitué d'un modèle hydrologique développé par EDYTEM pour le projet européen Alp-Water-Scarce. Dans cette thèse nous avons utilisé ce modèle hydrologique disponible pour simuler les quantités d'eau du bassin versant étudié mais il est tout à fait possible d'en utiliser un autre ayant des caractéristiques et des hypothèses de fonctionnement différentes. Cette section présente les caractéristiques du modèle hydrologique utilisé pour cette première expérimentation.

Celui-ci est membre de la famille des modèles TOPMODELS. Cette philosophie permet de construire des modèles parcimonieux et adaptables aux différents contextes hydrologiques. Elle se caractérise en effet par une approche modulaire des différents compartiments hydrologiques. Il est aisé de varier la complexité de leurs représentations numériques. Cette complexité est décidée en fonction de la hiérarchisation de leurs effets sur les pronostics hydrologiques désirés (*i.e.* concept de l'indice de similarité hydrologique). Ces modèles sont spatialisés au sens où l'ensemble des variables d'état hydrologique (*e.g.* contenu en eau des sols, flux de ruissellement, etc.) est calculé à l'échelle la plus petite du bassin versant (en général le pixel MNT). Ces modèles résolvent par contre une partie des équations de conservation de la masse à l'échelle des bassins versants, c'est-à-dire à l'échelle où il est le plus facile d'obtenir des données de terrain corroboratives (par exemple mesures des débits), ce qui leur assure une robustesse prouvée. Davantage de détails sont disponibles dans la nombreuse bibliographie sur ces modèles (*e.g.* dans les thèses de [Saulnier \[1996\]](#) et [Castaings \[2007\]](#)).

La version du modèle TOPMODEL utilisée dans notre recherche [[Tenevia, 2014](#)] inclue les corrections algorithmiques d'estimation du contenu en eau [[Saulnier et Datin, 2004](#)] ce qui est fondamental pour la quantification des ressources en eaux. Elle a été utilisée intensément pour divers questionnements scientifiques comme :

- l'évaluation des ressources en eau en fonction d'impacts climatiques [[Le Lay, 2006](#)], [[Le Lay et al., 2007](#)]
- la prévision des crues [[Michon, 2015](#)], [[Saulnier et Le Lay, 2009](#)], [[Le Lay et Saulnier, 2007](#)]
- l'étude de la propagation d'incertitudes et de l'estimation des sensibilités [[Castaings, 2007](#)], [[Castaings et al., 2009](#)]

Dans notre cas, le modèle est également couplé avec un module de calcul de la fonte nivale basé sur une approche de type degré-jour [[Tenevia, 2014](#)].

## E - III Le module anthropique : représente les usages de la ressource en eau

Le module hydrologique comme présenté dans la section précédente (E - II ) n'a pas été développé pendant cette thèse mais initié lors d'un projet européen précédent (Alp-Water-Scarce) puis recodé entièrement par la société Tenevia [[Tenevia, 2014](#)] (*cf.* section précédente). L'apport majeur de la thèse ci-présente est donc le développement d'un module anthropique capable d'utiliser et d'interagir avec le module hydrologique développé précédemment. L'interaction avec le module hydrologique est indépendante du modèle hydrologique utilisé.

L'objectif du module anthropique est de représenter les modalités de l'utilisation de l'eau par les activités humaines sur le territoire. Ainsi en combinant un module hydrologique représentant le milieu naturel et un module anthropique représentant les activités humaines, l'ensemble des interactions avec les ressources en eau est représenté sur le bassin versant. Pour ce faire, le module anthropique est divisé en différents éléments détaillés dans cette section.

### E - III - 1 La Régie des eaux *virtuelle*

#### Fonctionnement général

L'essentiel du fonctionnement du module anthropique est constitué par une Régie des eaux *virtuelle*. Cette dernière doit permettre la bonne répartition ou *gestion* de l'eau sur le bassin versant. Ainsi dans son fonctionnement elle :

- doit satisfaire des demandes en eau des différents usages anthropiques. Certains usages sont jugés d'avantage prioritaires que d'autres. Par exemple, l'AEP sera toujours jugée prioritaire à tous les autres usages (*e.g.* hydroélectricité, neige de culture)
- s'alimente en eau en prélevant au milieu naturel via des captages
- peut stocker temporairement de l'eau dans différents réservoirs.

L'objectif est de définir des règles algorithmiques qui permettent à cette régie des eaux virtuelle de fonctionner de façon indépendante de l'utilisateur du logiciel et de simuler un comportement réaliste. Ces règles algorithmiques rendant la gestion virtuelle autonome ont été définies essentiellement sur le fonctionnement des réservoirs.

Ainsi, pour fonctionner, les réservoirs font appel à des captages ou à d'autres réservoirs dits "sources" pour se remplir. Pour rendre autonome le fonctionnement de chaque réservoir, nous avons choisi de leur imposer la consigne suivante : chaque réservoir essaie à chaque pas de temps de se remplir au maximum dans la limite de son volume de stockage maximum. Ainsi, à chaque pas de temps, chaque réservoir interroge ses différentes sources d'approvisionnement pour effectuer des demandes en eau. Ces demandes seront satisfaites, partiellement satisfaites ou non satisfaites en fonction du volume disponible dans chacune de ses sources d'approvisionnement. Chaque source doivent elles-mêmes respecter la consigne de remplissage maximal possible.

En parallèle les réservoirs sont sollicités pour satisfaire les différents usages de l'eau. Comme la consigne de respecter les usages de l'eau est prioritaire par rapport à la consigne de remplir au maximum possible chacun des réservoirs, il se peut que les réservoirs ne soient pas remplis au maximum. Cela arrive quand par exemple les demandes en eau des usages anthropiques sont supérieures à l'eau fournie par le milieu naturel via les captages. Ces règles de gestion induisent donc une dynamique temporelle de remplissage des différents réservoirs.

Comme les usages de l'eau varient dans le temps de même que l'eau fournie par le milieu naturel aux captages, le respect de ces deux consignes et de leurs règles de priorité induit naturellement une dynamique temporelle de cette Régie des eaux *virtuelle*. Plusieurs cas de figure peuvent alors se présenter :

- Le cas le plus favorable quand l'eau fournie par le milieu naturel dépasse les demandes anthropiques en eau. Dans ce cas les différents réservoirs peuvent même stocker de l'eau jusqu'à leur capacité maximale.
- Le cas le plus fréquent quand les demandes anthropiques en eau sont satisfaites et une certaine réserve d'eau est stockée dans les différents réservoirs.
- Le cas limite, lorsque les demandes en eau anthropiques prioritaires sont satisfaites (AEP) mais ni les ressources en eau fournies par le milieu naturel, ni le stock des différents réservoirs permet de satisfaire entièrement les usages jugés moins prioritaires (hydroélectricité et neige de culture).
- Le cas extrême où les volumes stockés dans les réservoirs et le milieu naturel ne sont pas à même de satisfaire les usages en eau prioritaire. C'est la pénurie.

## Représentation du réseau d'alimentation en eau

La liaison entre le module hydrologique et le module anthropique se fait via le réseau d'alimentation en eau. En effet, pour rendre disponible l'eau du milieu naturel, il faut tout d'abord que celle-ci soit captée, puis stockée afin d'être distribuée aux différentes activités du territoire. C'est le rôle du réseau d'alimentation en eau .

Dans le modèle développé, le réseau d'alimentation en eau est représenté à travers plusieurs objets (*cf.* figure E.2) :

- les captages
- les conduites
- les réservoirs

Le fonctionnement et l'interconnection de ces différents objets constituant le réseau d'alimentation en eau sont développés ci-dessous.

### Les captages

Les captages constituent le véritable lien entre les ressources en eau exploitables du module hydrologique et le module anthropique. Ce sont eux qui prélèvent l'eau nécessaire aux activités

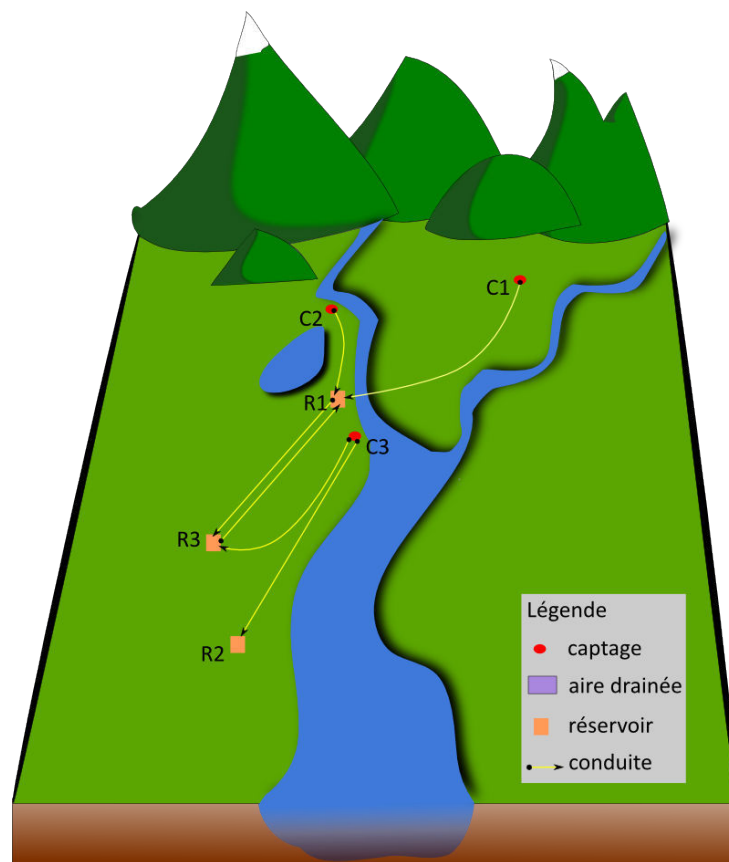


Figure E.2 – Représentation schématique des trois éléments constituant le réseau d'alimentation en eau

anthropiques dans le milieu naturel. La localisation de chaque captage permet de récupérer la quantité d'eau naturelle disponible à chaque pas de temps. En effet le modèle naturel utilisé pour le module hydrologique étant théoriquement distribué, il calcule à chaque pas de temps le débit d'eau naturel,  $Q_{nat}$ , circulant en tout point du bassin versant (cf. section E - II ). Le captage est caractérisé par un débit maximal de prélèvement,  $Q_{max}$ . L'eau captée et mise à disposition des réservoirs est donc égale à :

$$Q_{dispoCaptage} = \min(Q_{nat}; Q_{max})$$

A chaque pas de temps, le captage met ainsi potentiellement un débit d'eau , prélevé au milieu naturel, à disposition des réservoirs du bassin versant. Le transport de ce volume dépend ensuite des caractéristiques des conduites du réseau d'adduction d'eau.

### Les conduites et les réservoirs

Les conduites représentent les liaisons unissant les réservoirs et les captages. Elles ont uniquement un rôle de transport. Les conduites sont caractérisées par un débit maximum,  $Q_{maxConduite}$ , ainsi qu'un sens de transport. La valeur de débit maximum, limite les débits transportés d'un captage à un réservoir ou entre deux réservoirs pendant un pas de temps. Elle est fonction des caractéristiques de la conduite : dimensions, rugosité, pente, etc.

Le sens de transport d'une conduite est unique. La conduite possède un captage ou réservoir de départ et un réservoir d'arrivée : elle est le lien fonctionnel entre ces deux réservoirs. Dans le cas où la gestion autorise des flux dans les deux sens, c'est à dire quand chacun des réservoirs peut devenir la source ou le récepteur du second réservoir auquel il est relié, on choisit alors de créer deux conduites. Les réservoirs R1 et R3 de la figure E.2 sont dans cette configuration. Une des conduites sert à faire circuler l'eau de R1 vers R3. L'autre conduite sert à faire circuler l'eau de R3 à R1. Cette distinction permet de prendre en considération des débits maximum transportés différents. Ce cas de figure se réalise lorsque deux réservoirs ne sont pas au même niveau topographique par exemple. Imaginons que R1 se situe 400 m plus haut que R3, la force gravitaire pourra être utilisée pour transporter l'eau de R1 vers R3 alors qu'une pompe sera nécessaire pour faire "remonter" l'eau de R3 vers R1. Les débits maximums de transport seront donc potentiellement différents.

Chaque réservoir possède une liste de conduites le reliant à différents captages ou réservoirs. Une fois relié par une conduite, un réservoir a la capacité de prélever ou de distribuer de l'eau (selon le sens de la conduite) dans le captage ou dans l'autre réservoir auquel il est relié. Cette capacité de prélèvement est seuillée par la capacité maximale de transport de chaque conduite correspondant.

$$Q_{transport} = \min(Q_{dispo}; Q_{maxConduite})$$

Les réservoirs constituent la capacité de stockage artificielle de l'eau du bassin versant et ils sont donc caractérisés par :

- un volume de stockage maximum,  $V_{stock}$  mesuré en  $m^3$
- un volume disponible à l'instant  $t$ ,  $V_{dispo}(t)$  mesuré en  $m^3$

- une liste de conduites
- une liste de captages et de réservoirs sources

### La station d'épuration

La station d'épuration (STEP) constitue un objet qui collecte des eaux usées pour ensuite rejeter des eaux dépolluées. Elle doit donc être en mesure de répondre au besoin de traitement des eaux usées rejetées dans le réseau d'assainissement. Cet objet est donc caractérisé par un débit entrant, provenant des usages de l'eau relargant dans le réseau, et d'un débit sortant, calculé à partir de la capacité de la STEP à épurer l'eau.

A travers cet objet STEP il y a la prise en compte des pollutions de l'eau. Ainsi, le modèle doit être en capacité de simuler le fonctionnement imparfait de la STEP. Cette simulation se fait au travers de la propagation des eaux polluées. Tout captage, réservoir ou usage s'alimentant à partir de ressources pouvant potentiellement être polluées par les rejets de la STEP, sera déclaré comme pollué lors d'une simulation de mauvais fonctionnement de la STEP.

### Les règles de gestion

Un certain nombre de règles s'appliquent dans le fonctionnement de la Régie des eaux *virtuelle* et donc dans l'allocation d'eau aux usages. Ces règles peuvent être la traduction de la législation actuelle sur l'eau mais également de pratiques propres à chaque territoire.

### Le débit réservé

Depuis la loi sur l'eau de 2006, le prélèvement d'eau dans le milieu naturel est limité à neuf dixième du module. Cette limitation est mise en place afin de protéger les espèces animales et végétales du milieu qui ont un minimum de besoin en eau à assouvir pour exister. Le besoin du milieu environnemental est ainsi pris en compte à travers cette mesure de restriction légale. Ainsi la formule permettant de calculer le débit disponible (page 68) est pondérée par le débit réservé défini par la loi.

Soit  $Q_{reserve}$  le débit réservé égal actuellement à  $\frac{Q_{nat}}{10}$

$$Q_{dispoCaptage} = \min(Q_{nat} - Q_{reserve}; Q_{max})$$

Si des projets de loi futurs dans le domaine de l'eau envisagent de modifier le débit réservé afin de mieux prendre en compte les besoins du milieu environnemental, ces évolutions pourront être facilement prises en compte dans le modèle en modifiant simplement la valeur du débit réservé.



### Les priorités d'allocation dans le modèle

La deuxième règle de gestion du module anthropique est la définition de priorités dans l'allocation des usages. Ces priorités peuvent traduire des obligations législatives ou des stratégies locales.

L'AEP est l'usage prioritaire par rapport à tous les autres. Sa demande en eau sera examinée et satisfaite en premier lieu à chaque itération du modèle. Cette règle représente l'obligation légale qu'a le maire de chaque commune à fournir un accès continu à l'eau potable.

Les autres usages, en fonction de leur importance stratégique pour le territoire occupé, ont une priorité de deuxième, troisième voire quatrième rang si nécessaire. Deux usages peuvent avoir le même niveau de priorité. L'usage neige de culture peut être de priorité égale à celui de l'hydroélectricité par exemple. Dans ce cas, la satisfaction de ses usages se fait de manière concomitante, après la satisfaction des usages de priorité supérieure. L'usage hydroélectricité n'est pas favorisé par rapport à l'usage neige de culture dans cet exemple.

### La protection incendie

La règle de gestion de protection incendie est définie par la circulaire interministérielle n°465 du 10 décembre 1951 et impose une réserve incendie de 120 m<sup>3</sup> au niveau des réservoirs afin d'assurer un débit de 60 m<sup>3</sup>/h pendant deux heures sous un bar de pression. Il est donc nécessaire de garder un stock d'eau de réserve suffisant en cas de départ de feu pour être en mesure de l'éteindre. La traduction de cette contrainte dans le modèle se fait de la manière suivante :

Soit  $V_{incendie}$  le volume d'eau de réserve nécessaire pour palier au risque incendie du territoire et  $V_{tot}$  la totalité de l'eau stockée à l'instant  $t$  dans les réservoirs,

Lorsqu'un usage demande de l'eau à un réservoir source, si  $V_{tot} < V_{incendie}$ , le réservoir ne délivre pas d'eau à l'usage et conserve sa réserve pour répondre au risque incendie.

### Les captages et réservoirs de secours

La dernière règle de gestion présente dans le modèle permet de traduire des pratiques propres à chaque territoire. En effet du fait de leur obligation légale de fournir une eau potable en quantité et qualité suffisantes, les municipalités cherchent à protéger leurs possibilités de distribution d'eau et mettent en place des procédures de secours dans le cas où un captage ou réservoir serait hors-service ou pollué.

Ces stratégies sont prises en compte par le modèle. Chaque réservoir et captage possède sa liste de captages et réservoirs sources classiques ainsi qu'une ou plusieurs sources de secours. Dans un fonctionnement classique, les sources secours ne sont pas utilisées mais lors d'évènement exceptionnel comme la pollution d'un réservoir ou une situation de pénurie d'eau, le prélèvement dans les captages et réservoirs secours est possible.

Cette dernière règle de gestion est en particulier utile pour modéliser les conséquences de la pollution d'un captage ou réservoir sur l'alimentation en eau potable et la mise en place de solutions adéquates pour répondre à ces situations exceptionnelles.

## Représentation des usages de l'eau, généralités

Le dernier élément du fonctionnement de la Régie des eaux *virtuelle* est la bonne représentation des usages de l'eau. Il convient avant de présenter chacun de ses usages de s'interroger sur quelques généralités les caractérisants dans ce travail.

Le terme *usage de l'eau* peut faire référence à différentes interprétations. Si certains l'entendent simplement comme un synonyme de *consommation* par différentes activités socio-économiques comme [Barraqué et al. \[2011\]](#), d'autres considèrent plutôt l'*usage de l'eau* comme toutes fonctions/activités ayant besoin de ressources en eau pour fonctionner [[Reynard, 2001](#)]. Cette dernière définition prends donc en considération le milieu environnemental, ayant des besoins en eau pour maintenir le niveau de vie de l'ensemble des organismes vivants tant animaux que végétaux, comme un usage de l'eau. [Rousseau et al. \[2004\]](#) distinguent deux types d'usages. Les usages avec prélèvement qui comme leur nom l'indique prélèvent dans le milieu et sont susceptibles de rejeter une partie de ce prélèvement plus loin dans le réseau hydrographique et les usages sur place qui ne prélèvent pas d'eau au milieu mais qui nécessitent la présence de celle-ci pour fonctionner. Cette catégorie d'usage est représentée essentiellement par l'hydroélectricité, les usages récréatifs et le transport fluvial.

Dans cette thèse, le terme *usage de l'eau* est utilisé pour référer à toute activité qui à un instant donné prélève de l'eau au milieu naturel et rends la ressource indisponible pendant un temps définis. Ainsi cette définition n'englobe pas le milieu environnemental dont les besoins en eau seront représentés par les normes de prélèvement maximum de la ressource (développées dans la section traitant des règles de gestion(section E - III - 1 page 69)). L'hydroélectricité par contre est considérée comme un usage de l'eau selon la définition entendue dans cette thèse. En effet, même si l'hydroélectricité ne "consomme" pas de l'eau, au sens premier du terme, elle rend la ressource indisponible pour une autre activité socio-économique le temps de sa mobilisation. Elle est donc considérée comme un usage de l'eau dans cette thèse.

Le modèle développé s'applique aux territoires de montagne. Dans cet environnement, quatre usages de l'eau dominant. Il s'agit de :

- l'hydroélectricité
- l'alimentation en eau potable (AEP)
- la neige artificielle
- l'agriculture (essentiellement l'élevage)

Un cinquième usage pourrait être ajouté à la liste qui est celui de l'industrie. Certaines industries de montagne peuvent être très consommatrices d'eau (e.g. métallurgie, papeterie). La vallée de l'Arve, dont fait partie Megève, est par exemple connue pour son industrie de décolletage.

Le modèle développé pendant cette thèse, s'appuie sur un territoire où l'industrie est absente. Aussi cet usage de l'eau n'a pas été intégré dans le modèle. Néanmoins, il est tout à fait possible d'ajouter cette fonctionnalité si le besoin s'en fait ressentir puisque comme nous allons le voir, chacun des usages de l'eau est défini indépendamment de la nature de ce dernier.

En effet, le fonctionnement général du modèle est le calcul d'une demande en eau pour chaque usage à chaque itération. La demande en eau se définit comme la quantité d'eau nécessaire pour satisfaire les besoins de l'usage à un instant donné. La demande en eau est à distinguer de la consommation d'eau de l'usage qui représente la quantité d'eau réellement consommée, c'est à dire utilisée, par l'usage pendant l'itération. La demande en eau n'est pas forcément satisfaite à chaque itération et elle n'est donc pas forcément égale à la consommation réelle de l'usage.

Chaque usage est affilié à un ou plusieurs réservoirs dans lesquels ils prélèvent l'eau nécessaire à la satisfaction de sa demande selon des règles de gestion, présentées en page 69. Ainsi les réservoirs pour l'eau potable ne sont pas forcément ceux pour la neige de culture ou l'hydroélectricité.

Le fonctionnement de chaque usage est détaillé dans la suite de ce chapitre.

## E - III - 2 L'hydroélectricité

L'utilisation de l'hydroélectricité est massive dans les Alpes. [CIPRA \[2010\]](#) établit à 550 le nombre de centrales hydroélectriques dans les Alpes produisant plus de 10 MW et 2800 GWh par an en moyenne.

Cet usage de l'eau est de loin celui qui a le plus besoin d'eau pour fonctionner. [[Charnay, 2010](#)] estime la part de l'hydroélectricité 100 fois supérieure à la distribution d'eau potable qui représente elle-même 90% du reste des prélèvements sur le bassin versant du Giffre. Cela montre bien l'énorme différence de volume turbiné par rapport aux autres activités socio-économiques du territoire. Néanmoins, cette eau mobilisée, à l'évaporation près de l'eau évaporée dans les barrages, est rendue à l'hydrosystème naturel.

Si la plupart de la production d'électricité hydraulique se fait dans les grands ouvrages, il existe des multitudes de micro-centrales installées au niveau local au fil de l'eau ou dans les réseaux d'eau potable et usées. Ces installations plus modestes servent à fournir une électricité d'appoint, peu chère pour les communes en possédant. C'est ce type de micro-centrale que le modèle développé s'est attaché à représenter.

Le territoire support pour le développement du modèle possède une petite centrale hydraulique qui a la particularité de se situer dans le réseau d'eau potable (figure E.3). Cette centrale turbine tous les excédents du réseau d'eau potable non utilisés par d'autres usages. Afin de calculer la consommation d'eau de la turbine, le modèle prend donc la somme des excédents par pas de temps, modulée par la capacité maximum de la turbine et un seuil critique à partir duquel la turbine n'a plus l'autorisation de prélever dans les réserves d'eau potable. Soit :



Figure E.3 – Turbine, incluse dans le réseau d'eau potable, utilisée à Megève

$$D_{hydroelect} = \min\left(\frac{Q_{maxturbine}}{\Delta t}; V_{excedent}\right)$$

$D_{hydroelect}$  la demande en eau de l'usage hydro-électricité (m<sup>3</sup>)  
 $Q_{maxturbine}$  le débit maximum turbiné par pas de temps (m<sup>3</sup>/h)  
 $V_{excedent}$  le volume des excédents d'eau potable (m<sup>3</sup>)  
 $\Delta t$  le pas de temps du modèle

Dans un cas de figure où la centrale hydroélectrique se situerait en extérieur, c'est à dire au fil de l'eau ou sur un barrage, comme c'est le cas la majeure partie du temps, le calcul de la consommation d'eau des turbines se ferait de manière équivalente, c'est à dire le débit actuel de la rivière alimentant le barrage, modulée par la capacité maximum des turbines du barrage et par d'éventuelles normes de sécurité.

### E - III - 3 L'alimentation en eau potable

L'alimentation en eau potable est en général le deuxième usage le plus consommateur d'eau dans les milieux alpins. Il représente un enjeu significatif pour la municipalité. En effet, le deuxième principe de la gestion de l'eau en France énonce que *l'eau appartient à tous* et sous-entend ainsi que chaque personne a le droit d'accéder à l'eau potable dans des conditions économiques acceptables par tous (cf. section A - III page 18). C'est à la municipalité que revient la responsabilité de l'approvisionnement en eau potable (cf. section A - I - 2 page 8) tant en terme de qualité que de quantité. La municipalité doit donc assurer un service de qualité en continu sur la distribution d'eau potable.

Dans les communes touristiques de montagne, cette prérogative est un véritable enjeu. En effet, ces communes peuvent décupler leur nombre d'habitants pendant les saisons touristiques. Les municipalités touristiques de montagne sont donc caractérisées par une grande fluctuation saisonnière des consommations d'eau potable. La figure E.4 montre deux pics de consommation principaux : les hautes saisons touristiques d'hiver et d'été avec une prédominance de l'hiver.

Dans son rapport de 2002 [Amoudry, 2002] le Sénat note que l'afflux de touristes, spécialement en hiver, accroît la pression sur la demande en eau à une période où celle-ci est peu abondante. C'est à cette même période que les hydrosystèmes alpins sont à l'étiage (cf. section

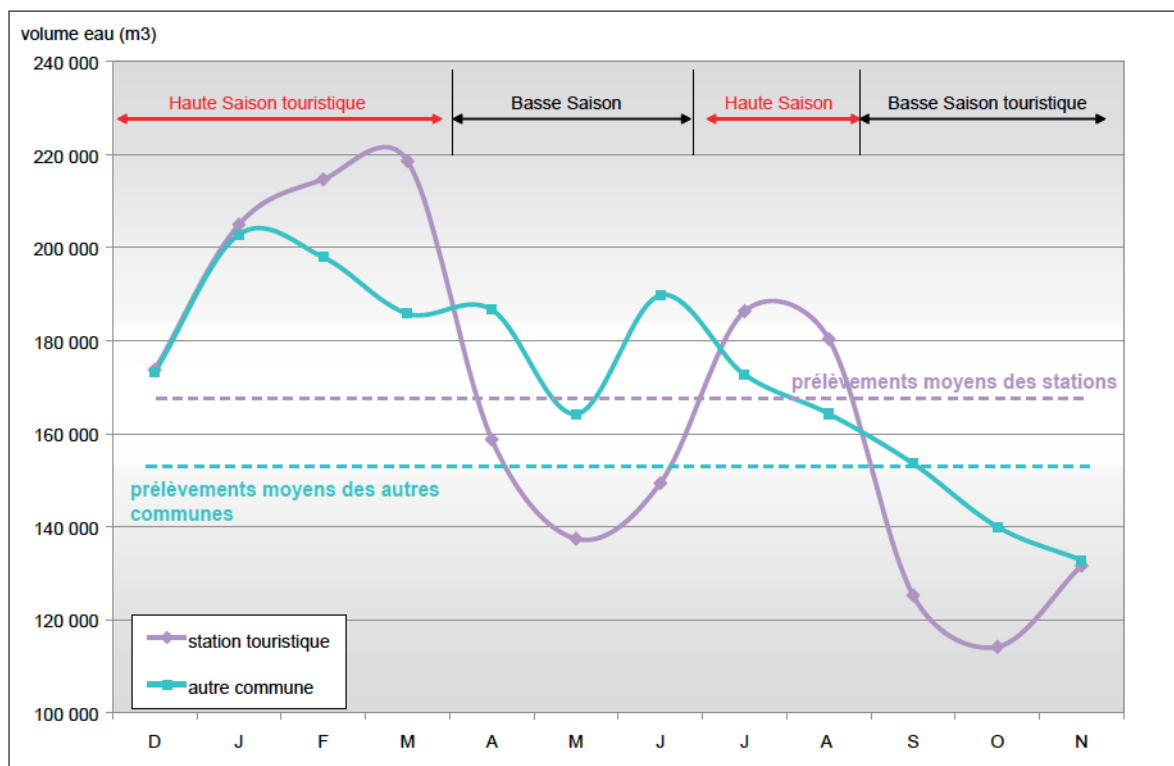


Figure E.4 – Prélèvements moyens mensuels sur 2003, 2004 et 2005 en eau potable des stations touristiques et des autres communes du bassin versant du Giffre. Source : Charnay [2010]

B - II ). [Amoudry, 2002] estime que pour une station de ski accueillant 30000 personnes pendant la saison touristique, les besoins en eau sont estimés à 6000 m<sup>3</sup> par jour correspondant à un débit moyen journalier de 70 l/s. Or les débits mobilisables en février sont en moyenne de 10 l/s/km<sup>2</sup> pour les régimes glaciaires et 20 l/s/km<sup>2</sup> pour les régimes de type nival. Les stations de ski sont de plus largement situées dans les têtes de bassin versant et possèdent donc une surface drainée faible.

La gestion de l'eau potable en station nécessite donc une bonne gestion des stocks d'eau afin de ne pas atteindre la pénurie d'eau. Charnay [2010] indique que la principale problématique de la gestion quantitative de l'AEP en montagne est la satisfaction des demandes en eau élevées des stations touristiques. Elle note que les pénuries d'eau recensées sur le bassin versant du Giffre touchent à 90% les communes touristiques. Il est donc nécessaire de bien prendre en compte cette spécificité des municipalités possédant une station de ski sur le territoire pour représenter l'usage eau potable dans le modèle.

C'est dans cette optique que l'usage AEP est décliné en deux catégories distinctes dans le modèle :

- l'AEP locale correspondant à la consommation des habitants permanents de la municipalité
- l'AEP touristique correspondant à la consommation d'eau potable des touristes séjournant dans la municipalité

Le calcul de la consommation de l'AEP locale et de l'AEP touristique prend en compte

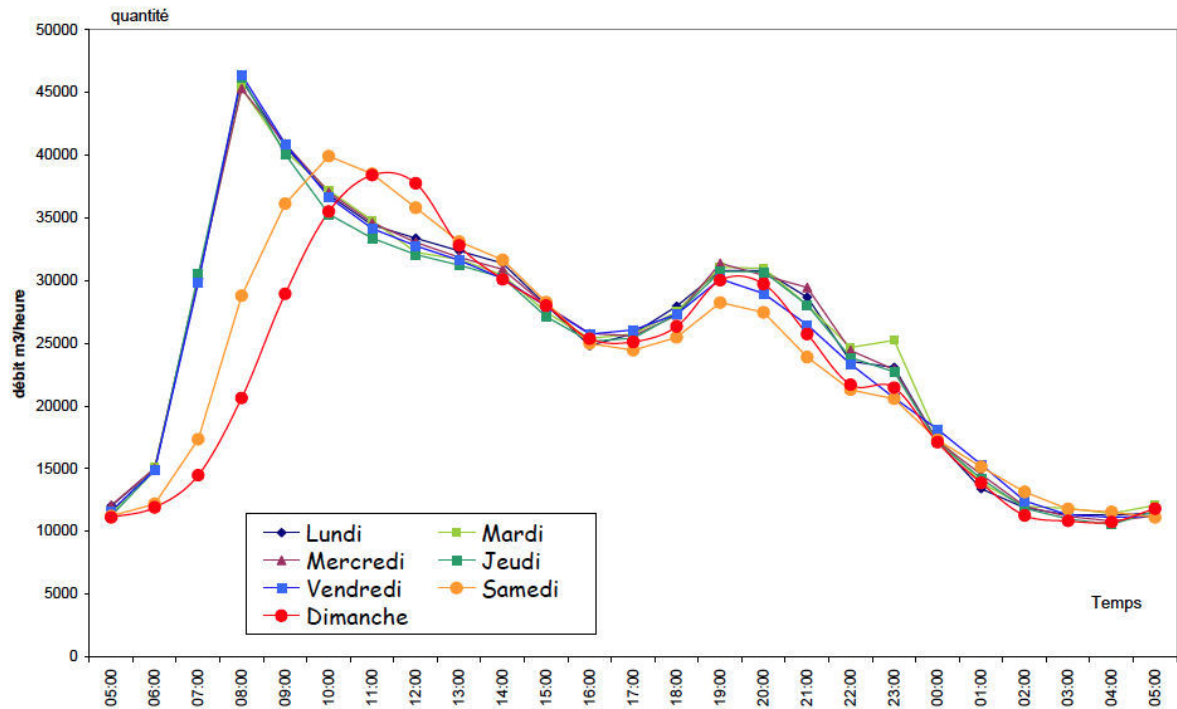


Figure E.5 – Courbe journalière de la consommation à Paris. Source : [Euzen \[2004\]](#)

la variation horaire des consommations. La figure E.5 montre la variation des consommations horaire chaque jour de la semaine à Paris. Après des heures de la nuit très peu consommatrices, les consommations d'eau repartent à la hausse dès 6h du matin avec les chasses d'eau et douches mises en action au moment du réveil. La pointe de consommation matinale est observée à 8h. Une deuxième pointe est observée vers 19h30 correspondant au dîner. Les consommations chutent ensuite progressivement pour atteindre leur plus bas niveaux entre 3h et 5h du matin [[Euzen, 2004](#)].

Ces variations sont prises en compte dans le modèle. La courbe de la figure E.5 a été traduite grossièrement par des coefficients horaires, le coefficient 1 représentant la plus petite consommation, c'est à dire celle entre 3h et 5h du matin. Le tableau E.1 présente les variations de consommation horaires pour chaque journée. Ces variations permettent de mieux répartir et moduler la consommation d'eau potable sur la journée afin de mieux refléter la réalité. Néanmoins en pratique, l'analyse des résultats du modèle se fait au pas de temps journalier (même si le modèle travaille au pas de temps horaire) compte-tenu du pas de temps de certains forçages. Le pas de temps journalier est pertinent pour apporter des réponses concrètes pour l'adaptation au changement climatique. Ainsi, les incertitudes générées par la traduction des consommations journalières en consommations horaires n'ont pas de réelles importances. Cependant, l'utilisation de consommations variables en fonction de l'heure de la journée prouve qu'avec des données suffisamment détaillées, le modèle est capable de descendre à un niveau d'analyse très fin.

La distinction entre le calcul de la consommation de l'AEP locale et de l'AEP touristique se fait sur la quantité d'eau journalière consommée. Pour le calcul de la consommation de l'AEP locale, le modèle se base sur la valeur communément admise d'une consommation moyenne française

Table E.1 – Consommations en litre appliquées à chaque heure pour le calcul de la consommation d'eau potable

Heure	Consommation en litre	Heure	Consommation en litre
0	4.05	12	8.10
1	4.05	13	8.10
2	3.24	14	8.10
3	2.70	15	6.75
4	2.70	16	5.40
5	2.70	17	5.40
6	3.24	18	5.94
7	6.75	19	8.10
8	11.61	20	8.10
9	10.80	21	6.75
10	9.45	22	5.94
11	8.90	23	5.40

de 152 l/j<sup>1</sup>.

Pour la consommation moyenne journalière de l'AEP touristique, le modèle se base sur une consommation touristique égale à celle d'un habitant, c'est à dire 152 l/j. Il n'existe pas de statistiques précises sur la consommation d'eau d'un touriste. En l'absence de valeur certaine, nous avons pris la décision de fixer la consommation touristique équivalente à celle d'un habitant local. C'est également de cette manière qu'est déterminée la capacité maximum d'évacuation des réseaux d'eau [[régie des eaux Megève, 2013](#)] et une méthode de calcul des besoins théoriques [[SCERCL, 2009](#)].

Les consommations du tableau E.1 servent à établir la consommation horaire d'une personne pendant l'itération. Cette consommation unitaire est ensuite multipliée par le nombre d'habitants et par le nombre de touristes présents. C'est ainsi que sont simulés les consommations d'eau potable locale et touristique dans le modèle développé. Pour résumer :

$$D_{AEPlocal} = C_h \times n_h$$

$$D_{AEPtourist} = C_h \times n_t$$

$D_{AEPlocal}$  la demande en eau de l'usage AEP local (m<sup>3</sup>)

$D_{AEPtourist}$  la demande en eau de l'usage AEP touristique (m<sup>3</sup>)

$C_h$  la consommation horaire d'une personne (m<sup>3</sup>)

$n_h$  le nombre d'habitants du territoire étudié

$n_t$  le nombre de touristes présents à l'instant  $t$  sur le territoire

1. [www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr](http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr)





Figure E.6 – Solutions artisanales pour enneiger les pistes de la station des Gets (Haute-Savoie) pendant l'hiver 1963-1964. *Source* : (a) Le Dauphiné Libéré, 23 janvier 1964 et (b) Le Dauphiné Libéré, 25 janvier 1964, cités in [Paccard \[2010\]](#)

### E - III - 4 La neige artificielle

#### La neige artificielle, quel besoin ?

Dans une économie fortement dépendante du tourisme hivernal lui-même basé sur la pratique du ski, la présence de neige est devenue une nécessité. [Gauchon \[2009\]](#) montre que depuis le développement du tourisme hivernal en montagne après la première guerre mondiale, la neige s'est affirmée comme la ressource centrale de l'économie des sports d'hiver. Il détermine que plus la spécialisation des municipalités envers le tourisme hivernal est forte, plus la vulnérabilité face à des hivers sans neige est forte également.

Dès lors, la recherche de solutions pour limiter cette vulnérabilité face à l'aléa climatique neige a commencé très tôt dans les stations de sports d'hiver. Les premières solutions trouvées ont été artisanales, la neige était déplacée d'un point vers un autre à grands renforts de pelles (figure E.6). Après d'autres tentatives qui n'ont pas perduré comme le transport de neige par camion [[Paccard, 2010](#)] ou l'installation de télé-skis temporaires dans les endroits enneigés [[Gauchon, 2009](#)], les métiers de la neige se professionnalisent et s'orientent vers la production de neige artificielle.

L'invention des enneigeurs est apparue aux Etats-Unis dans les années 1950. La première station française à importer ce processus et à le tester sur son domaine skiable se situait dans



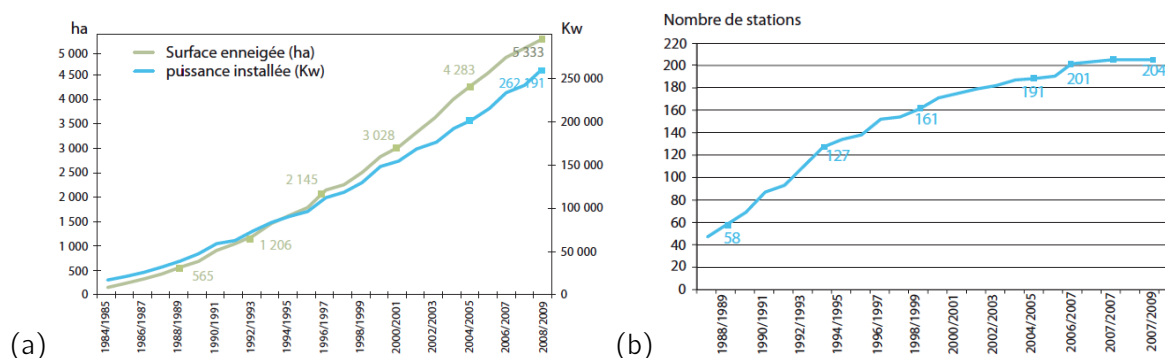


Figure E.7 – Évolution de la surface enneigée et de la puissance des enneigeurs installés (a) et du nombre de stations de sports d'hiver équipées d'enneigeurs (b) sur le territoire français. *Source : ODIT [2009]*

les Vosges [Magnier, 2013] en 1963. C'est ensuite au milieu des années 1960 que sont effectués les premiers essais d'enneigeurs dans les Alpes. Cet équipement s'est généralisé sur l'ensemble des stations de ski de l'arc alpin à partir de la fin des années 1980. L'historique de l'évolution de l'enneigement artificiel décrit succinctement ci-après se repose en partie sur l'analyse du chapitre 3 de la thèse de Paccard [2010] et le chapitre 2 de la thèse de Magnier [2013]. Il est d'ailleurs conseillé de se référer à ces ouvrages pour un approfondissement de la présentation faite ci-dessous.

La croissance de l'enneigement artificiel a été particulièrement rapide en France. Pendant l'hiver 1979-1980, 10 stations enneigeant 19 ha étaient comptabilisées. Pendant l'hiver 2009-2010 c'est 5600 ha qui sont enneigés artificiellement soit 23% de la surface totale des pistes de ski françaises. La figure E.7 montre bien cette évolution rapide des surfaces enneigées artificiellement depuis les années 1980. Paccard [2010] calcule qu'entre 2002 et 2009, la surface des pistes équipées a augmenté de plus de 150%.

L'augmentation des surfaces enneigées artificiellement est amenée à poursuivre sa progression sur toutes les tranches d'altitudes des stations. En effet, si le recours à la neige artificielle était initialement pour combler un déficit en neige naturelle, il est devenu par ses caractéristiques physiques un outil essentiel des stations de skis pour constituer la sous-couche notamment sur les zones de liaison et les pistes les plus fréquentées [Berlioz et al., 2008]. Ainsi le développement d'équipements pour l'enneigement artificiel n'est plus cantonné aux stations ayant une forte vulnérabilité face à l'aléa neige. Dès lors une très forte augmentation d'équipements dans les domaines de haute altitude [Magnier, 2013] est constatée.

Le rapport d'étude du ministère de l'écologie de 2009 [MEEDDAT, 2009] rapporte que "les responsables de stations de ski mettent en avant la garantie économique que leur fournit la neige artificielle. Cette neige produite en avant-saison pour former une sous-couche d'ancrage à la neige naturelle permet de sécuriser les dates d'ouverture des stations et favorise la commercialisation des réservations de séjours". Ainsi "de palliatif conjoncturel par le passé, la neige de culture est maintenant présentée par les responsables de stations comme un équipement dont ils ne peuvent plus se passer, pour rentabiliser sur une durée maximale les investissements très lourds

de l'immobilier de loisirs et des remontées mécaniques." La mise en place de cette sous-couche est devenue une étape essentielle de tout exploitant de domaine skiable, ce qui est illustré par la proportion de production des mois de novembre et décembre qui représentent en moyenne 60% de la neige produite sur l'ensemble de la saison [Marnezy et Ramploux, 2006].

L'équipement en neige de culture sur le territoire français a donc connu un rapide essor qui tend à se poursuivre largement dans les prochaines années comme en témoignent le nombre de projets déposés.

En comparaison avec les moyennes des pays voisins de l'Espace Alpin, la France semble moins équipée en neige de culture. Paccard [2010] réalise une carte (p.133) à partir des données de CIPRA [2004] et de RMS [2008] de la part de l'enneigement artificiel sur six pays de l'arc alpin : l'Allemagne, la France, la Slovénie, la Suisse, l'Italie et l'Autriche. En proportion, la France est en 4<sup>ème</sup> position par rapport aux six pays de l'arc alpin pour le recours à la neige de culture avec 13% de son domaine enneigé en 2004 contre 40% pour l'Autriche et l'Italie qui sont les pays ayant le plus recours à l'enneigement artificiel [CIPRA, 2004]. Cette part semble avoir grandement augmenté sur l'ensemble de l'arc alpin ces dernières années puisque RMS [2014] estime à 60% la part des pistes enneigées en Autriche, 41% en Suisse en 2012/2013 alors qu'en France ce sont 25% des pistes qui sont enneigées artificiellement 2008/2009 [ODIT, 2009] (cf figure E.7).

## Les techniques de production de la neige artificielle

Le principe de la production de neige artificielle est de pulvériser des gouttelettes d'eau sous pression dans une atmosphère suffisamment froide pour qu'elles se transforment en neige avant de retomber au sol. Cette transformation s'effectue en quatre étapes principales (figure E.8) décrites brièvement ci-dessous.

L'*atomisation* est la première étape pour constituer de la neige artificielle. Elle consiste à pulvériser de l'eau sous forme de fines gouttelettes. Plus les gouttelettes sont fines et plus la cristallisation en glace est facilitée.

La *nucléation* consiste à libérer un mélange d'eau et d'air sous pression. Le mélange projeté cristallise immédiatement à la sortie de l'enneigreur formant des microcristaux utilisés comme noyaux de nucléation. Ces derniers ont pour rôle de favoriser le changement de phase (de liquide vers solide) des gouttelettes pulvérisées lors de la phase d'atomisation. La rencontre du flux de nucléation avec le flux d'atomisation permet la création de neige. Cette étape, appelée *insémination* permet de palier au fait que l'eau ne congèle pas forcément aux températures inférieures à 0°C. La rencontre avec les micro-cristaux générés pendant la phase de nucléation permet alors de déclencher le phénomène de cristallisation de l'eau.

L'*évaporation* est la troisième étape de la production de neige. Les gouttelettes sont projetées dans l'air ambiant. Cette projection implique une évaporation de leur partie extérieure. Ce phénomène refroidit l'air au contact imminent de la gouttelette par des phénomènes physiques favorisant ainsi la congélation de celle-ci. Cette étape est favorisée par un air sec.

La *convection* est la dernière étape du processus de production de neige. La gouttelette

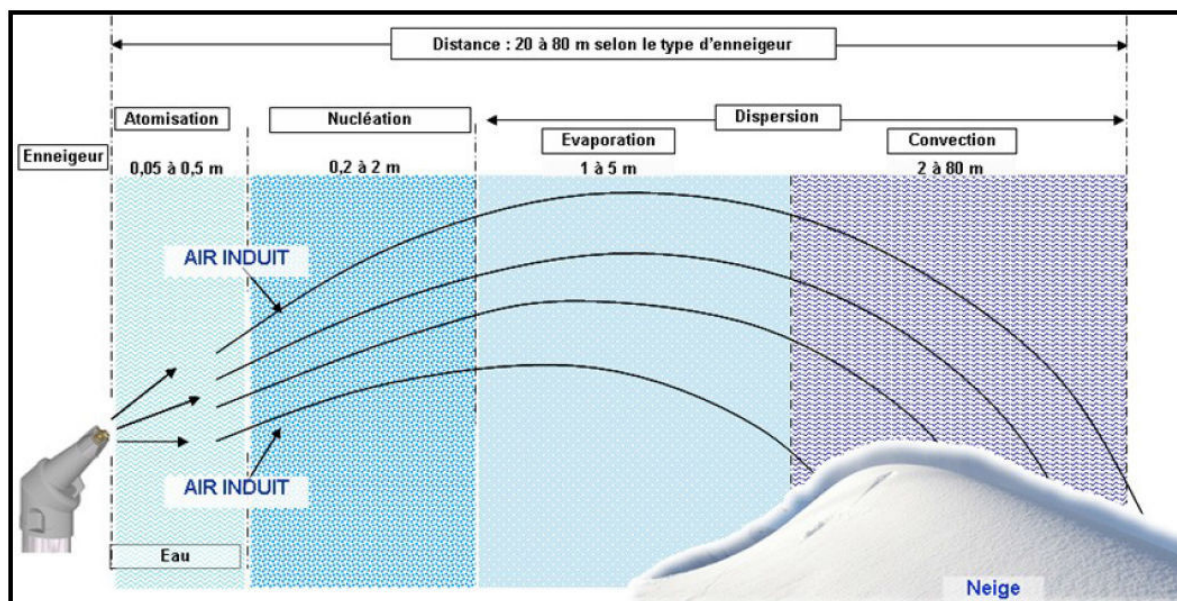


Figure E.8 – Les phases de production de la neige artificielle à partir d'un enneigeur. *Source : SNTF [2002] cité in Magnier [2013]*

échange de la chaleur avec l'air ambiant et tombe au sol sous forme de neige. Les étapes d'évaporation et de convection sont regroupées sous le terme de *dispersion*. De l'enneigeur jusqu'au lieu d'atterrissage, la gouttelette peut parcourir jusqu'à 80 m selon la catégorie des enneigeurs.

La création de neige artificielle par le processus décrit ci-dessus engendre la perte d'une certaine quantité d'eau par évaporation. Cette part d'eau évaporée n'est pas transformée en neige et est donc considérée comme une perte. Dans sa thèse, page 164, [Paccard \[2010\]](#) recense les différentes études mentionnant des volumes de pertes par évaporation lors de l'utilisation d'enneigeurs. S'il remarque que les chiffres les plus souvent avancés sont une perte de 10% à 30%, il note que l'estimation des volumes de pertes par évaporation n'a jamais été établie avec certitude. Ainsi, en l'absence de données certaines, nous avons choisi dans cette étude d'utiliser la valeur moyenne le plus souvent mentionnée, c'est-à-dire une perte de 20%.

Ce processus de création de neige nécessite des ressources et des conditions climatiques particulières. Du point de vue des ressources la création de neige nécessite l'apport d'eau. La valeur généralement avancée est un ratio de 1 m<sup>3</sup> d'eau pour créer 2 m<sup>3</sup> de neige [[MEEDDAT, 2009](#)]. La consommation d'eau des enneigeurs est concomitante à l'étiage des hydrosystèmes alpins et au pic de consommation de l'eau potable. Or, la loi sur l'eau de 2006 impose un débit maximal de prélèvement calculé sur la base des écoulements du torrent. Ainsi, le débit prélevable à l'étiage est très faible et ne permet pas de satisfaire les besoins pour la neige de culture souvent concentrés sur de petites fenêtres de production. En conséquence, les domaines skiables se sont de plus en plus équipés de retenues d'altitude (figure [E.9](#)). Ces retenues d'altitude ont deux avantages : elles permettent de produire de la neige à fort débit sur de petites périodes (elles maximisent donc l'exploitation des "fenêtres de froid" pour la production) et elles permettent l'étalement des prélèvements d'eau dans le milieu naturel et dans les réseaux existants réduisant ainsi l'impact sur la ressource en eau en période d'étiage [[MEEDDAT, 2009](#)]. Le développement

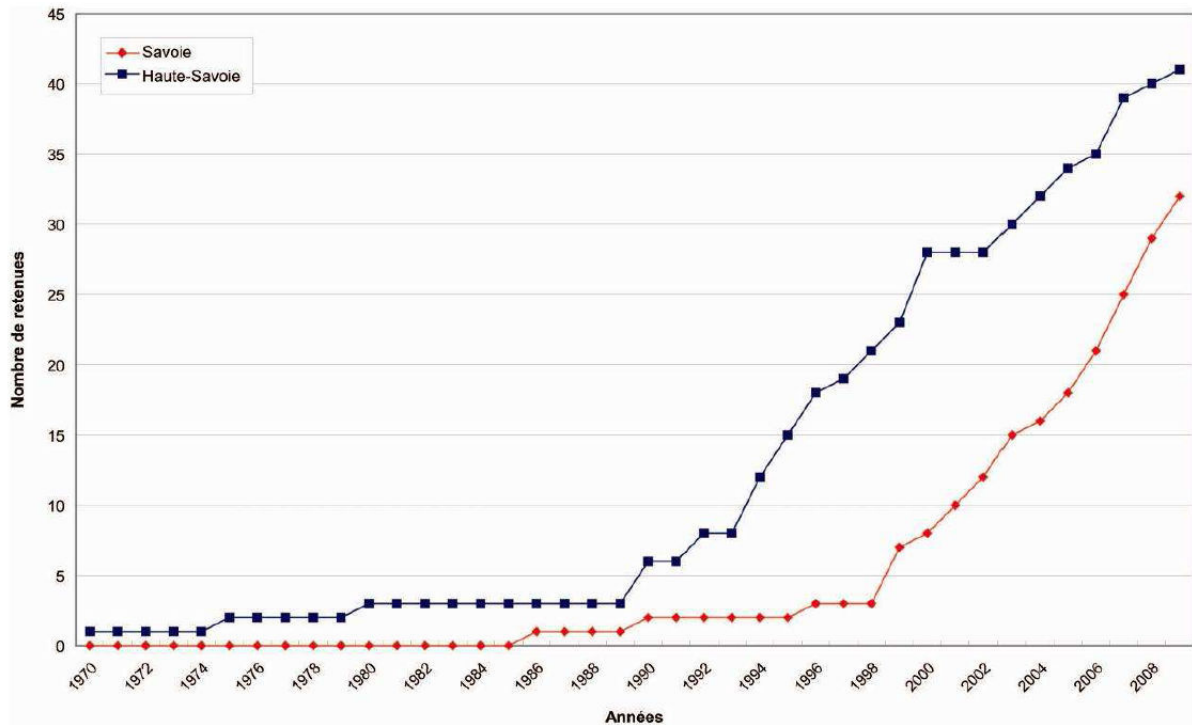


Figure E.9 – Évolution du nombre de retenues d'altitude depuis 1970 en Savoie et Haute-Savoie.  
Source : [DDT-Savoie \[2009\]](#)

des retenues d'altitudes parfois de très grande taille (e.g. retenue des Tuffes sur le domaine des Arcs d'une capacité de 404 000 m<sup>3</sup> d'eau) n'est pas sans poser de nombreuses questions tant du point de vue des risques tels que glissement de terrain que d'un point de vue environnemental sur l'impact paysager et sur les ressources en eau du territoire. Ces points sont développés dans les différents ouvrages déjà mentionnés dans cette section [[Paccard, 2010](#)], [[Magnier, 2013](#)], [[DDT-Savoie, 2009](#)], [[MEEDDAT, 2009](#)], etc.

Les autres sources d'approvisionnement en eau pour la production de neige sont les prélèvements directs dans le cours d'eau (soumis à la loi sur l'eau de 2006) et l'utilisation du trop-plein des réseaux d'eau potable. En 2008, 60% de l'eau utilisée pour la production de neige provient de retenues, 30% de prélèvements directs en cours d'eau et 10% de trop-pleins du réseau d'eau potable [[Berlioz et al., 2008](#)].

Ces trois sources d'approvisionnement peuvent être présentes sur un même site et s'entremêler (des retenues d'altitude peuvent être remplies par des trop-pleins d'eau potable si nécessité et *vice-versa* la retenue d'altitude peut approvisionner le réseau d'eau potable en cas de pénurie dans certains cas). Cette complexité (qui ne s'exprime pas forcément sur tous les domaines skiables) est bien représentée par la figure [E.10](#).

L'autre ressource nécessaire est la fourniture d'air comprimé et donc d'énergie pour comprimer cet air en salle des machines ou sur l'enneigreur lui-même. De grands progrès ont été effectués sur la consommation énergétique des enneigeurs depuis leur invention (comme présenté dans la figure [E.11](#)). En 2006 la production d'1 m<sup>3</sup> de neige nécessitait 2.8 kWh au lieu du double en 1996

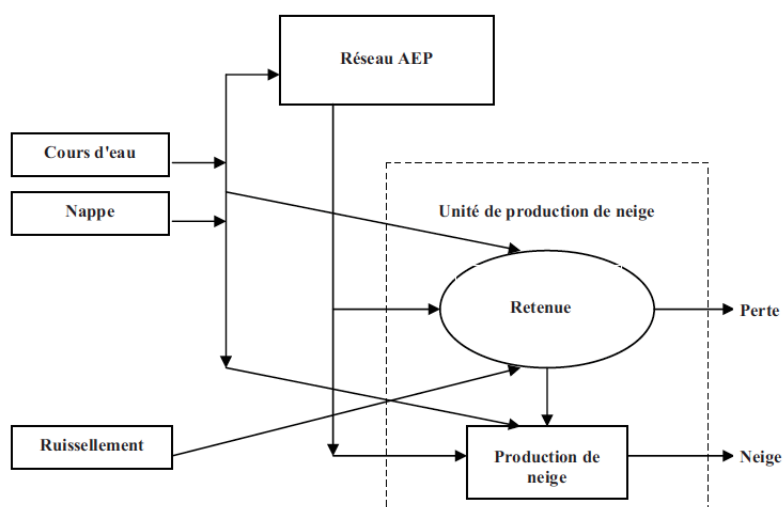


Figure E.10 – Interconnexion des sources d’approvisionnement d’eau pour les unités de production de neige *Source : MEEDDAT [2009]*

[Berlioz et al., 2008]. Les nouvelles générations d’enneigeurs permettent également de produire plus d’air comprimé. Un gérant de remontées mécaniques nous informait en juin 2014 que le facteur limitant pour la production de neige de culture sur son domaine skiable était la capacité des enneigeurs à fournir de l’air comprimé et non pas la disponibilité en eau. Les améliorations techniques dans ce domaine ont donc permis de développer la production de neige artificielle dans les stations de ski en diminuant les contraintes sur cet aspect air comprimé.

Du point de vue des conditions climatiques, un certain nombre de contraintes s’imposent pour produire de la neige. Comme expliqué dans les différentes phases de production de neige artificielle à partir d’un enneigeur, des conditions de températures et d’humidité particulières sont nécessaires pour la transformation de gouttelettes d’eau en cristaux de neige. La combinaison de ces deux paramètres météorologiques est connue sous le terme de *température humide*. La température humide se mesure à l’aide d’un psychomètre. Elle peut également être calculée en fonction de la température sèche (mesurée avec un thermomètre classique) et de l’humidité (mesurée à l’aide d’un hygromètre). Il existe également des tables qui mettent en relation température et taux d’humidité pour trouver rapidement la température humide comme présenté dans Magnier [2013] p.88. D’une manière générale, plus l’air est humide et plus la température devra être basse pour pouvoir produire de la neige avec les enneigeurs. A l’heure actuelle, les installations d’enneigement artificiel sont programmées pour démarrer à partir d’une température humide de -4°C [Paccard, 2010]. Dans les meilleures conditions d’humidité, c’est à dire par temps sec, les enneigeurs actuels permettent de produire de la neige de qualité suffisante à partir de -2°C dans les Alpes françaises.

La température de l’air a aussi un impact sur la consommation des enneigeurs et sur la qualité de la neige. Une température plus élevée entraîne une consommation d’air comprimé plus intense [Berlioz et al., 2008] et une qualité de neige produite moins intéressante pour les gestionnaires car plus humide. Ces paramètres de consommation d’énergie et de qualité de neige sont des facteurs qui ont leur importance dans le choix de déclenchement des enneigeurs.

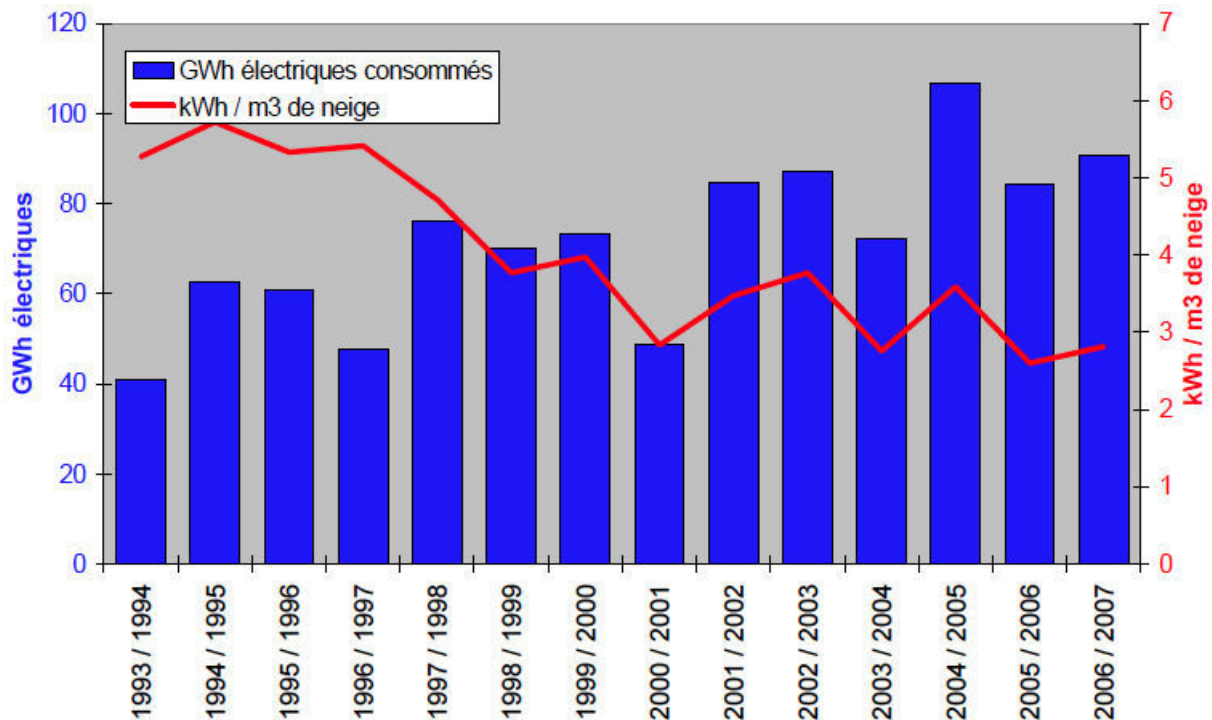


Figure E.11 – Évolution de la consommation électrique pour la production de neige de l'hiver 1993-1994 à l'hiver 2006-2007. Source : [Berlioz et al. \[2008\]](#)

D'autres phénomènes climatiques comme la pression atmosphérique et le vent interviennent également dans la production de neige. Néanmoins leurs impacts restent bien moins importants que celui de la température. Les thèses de [Magnier \[2013\]](#) et [Paccard \[2010\]](#) peuvent être consultées pour approfondir l'influence de ces deux phénomènes.

### La traduction de ces techniques dans le modèle

Dans le modèle, le calcul de la demande en eau de l'usage neige de culture cherche à prendre en compte de la manière la plus cohérente les contraintes et les pratiques de production de neige décrites précédemment. Pour ce faire, le modèle prend en compte plusieurs paramètres tels que :

- La température sèche,  $T$  en °C
- La température seuil,  $T_s$  en °C, représentant la température à partir de laquelle il est possible de produire de la neige
- La date,  $d$
- L'heure de la journée,  $h$
- la hauteur de sous-couche de début de saison,  $H_s$  en m, représentant la hauteur de neige artificielle souhaitée sur la piste pour servir d'ancrage à la neige naturelle
- La hauteur de neige déjà présente sur la piste,  $H_p$  en m



- Le seuil minimum de skiabilité,  $H_{min}$  en m, représentant la hauteur de neige sur la piste minimum nécessaire pour la pratique du ski
- La capacité de production maximum des enneigeurs,  $C_{max}$  en m<sup>3</sup>/h, représentant le volume d'eau maximum envoyé en un pas de temps par les enneigeurs pour produire de la neige
- La surface des pistes enneigées  $S$  en m<sup>2</sup>
- Les pertes dues à l'évaporation d'une partie de l'eau utilisée,  $e_s$  en%

Ces paramètres ont été déterminés pour simuler au plus juste des pratiques d'enneigement.

Du point de vue des contraintes, la demande en eau de l'usage neige de culture ne peut être positive que lorsque la date est comprise entre le 15 novembre et le 20 mars et l'heure entre 18h et 4h du matin. Ces contraintes respectent la période de production des enneigeurs. De même, de la neige ne peut pas être créée lorsque la température extérieure est trop élevée.

Soit  $D_{neige}$  la demande en eau pour la neige de culture en m<sup>3</sup>.  $D_{neige}$  ne peut être supérieur à 0 que si :

15 novembre <  $d$  < 30 mars

18 <  $h$  < 4

$T < T_s$

Du point de vue de la pratique, la demande en eau se divise en 3 phases distinctes : une phase de production de la sous-couche de début de saison, une phase de production pendant les fêtes de fin d'année et une phase de production en mode normal.

Pendant la phase de production de la sous-couche :

$$D_{neige} = C_{max} \text{ si } H_p < H_s \text{ et } D_{neige} = 0 \text{ si } H_p \geq H_s$$

Pendant la phase de production des fêtes de Noël :

$$D_{neige} = C_{max}/2 \text{ si } H_p < H_{min} \text{ et } D_{neige} = 0 \text{ si } H_p \geq H_{min}$$

Pendant la phase de production normale :

$$D_{neige} = C_{max} \text{ si } H_p < H_{min} \text{ et } D_{neige} = 0 \text{ si } H_p \geq H_{min}$$

La spécificité de la phase de production des fêtes de Noël vient du fait que la station est généralement pleine en terme d'occupation des lits touristiques et que la consommation d'eau potable est à son maximum. L'usage neige de culture cherche donc à minimiser sa production pour ne pas nuire à l'AEP. Cette modalité peut-être supprimée dans le cas où le modèle serait appliqué à un autre territoire n'ayant pas cette spécificité.

Pour répondre à la demande en eau de l'usage neige, le modèle prend en compte la perte,  $e_s$ , et doit donc fournir plus d'eau pour atteindre la demande en eau de l'usage.

A chaque pas de temps, la hauteur de neige sur la piste est remise à jour en prenant en compte les spécificités de la neige artificielle. La densité de la neige artificielle étant plus forte que celle de la neige de culture sa fonte est moins rapide. Ces critères sont pris en compte dans le modèle.

Ainsi le coefficient de fonte de la neige de culture et sa densité sont différents de ceux de la neige naturelle.

Le calcul de la hauteur de neige sur la piste se fait à chaque itération selon le processus suivant :

	$F$ : lame de neige fondue (m)
	$C_f$ : coefficient de fonte de la neige(m/h)
Calcul de la fonte :	$T$ : température à l'instant $t$ (°C)
$F = C_f \times (T - T_c)$	$T_c$ : température critique à partir de laquelle la neige fond (°C)
	$L$ : contenu en eau de la neige sur la piste (m)
	$L_{t-1}$ : contenu en eau de la neige sur la piste à l'itération précédente (m)
Calcul du contenu en eau de la neige :	$P_s$ : pluies solides tombées sur le bassin versant (m)
$L = L_{t-1} + P_s - F$	$F$ : lame de neige fondue (m)
	$H$ : hauteur de neige sur la piste (m)
Calcul de la hauteur de neige :	$L$ : contenu en eau de la neige sur la piste (m)
$H = L/d$	$d$ : densité de la neige

### E - III - 5 L'agriculture

L'agriculture de haut bassin versant de montagne est principalement caractérisée par de l'élevage. Le mode de production est souvent basé sur le pastoralisme et la mise en alpage estival [Soraruff, 2012]. Il en résulte un mode d'élevage non intensif avec une forte valeur ajoutée à travers des produits labélisés (AOC, AOP, etc.) notamment dans le domaine de la production de fromages. Ces productions sont néanmoins encadrées par des chartes de qualité très strictes quant aux conditions d'élevage.

Outre l'aspect économique et identitaire de l'élevage de montagne, celui-ci a un véritable rôle d'entretien des paysages. En effet, avec le départ de populations des montagnes vers les villes se traduisant par une déprise agricole, les paysages tendent à se fermer [Beyerbach, 2011]. C'est alors que le rôle des troupeaux dans l'entretien des paysages se révèle. Les troupeaux en broutant dans différentes zones de montagne empêchent l'avancée de forêt et permettent de maintenir une certaine ouverture des paysages caractérisée par la présence de prairie. Cet aspect est important et valorisé par les autorités publiques qui mettent en place pour différentes raisons des programmes de soutien à l'agro-pastoralisme en montagne [Beyerbach, 2011].

La quantification de la demande en eau des bovins et ovins présents sur le territoire montagnard



dans le modèle est assez simple. Il existe une base de données très précise sur les besoins en eau par catégorie d'animal [[Ward et McKague, 2007](#)]. Cette base a servi pour calculer la demande en eau de l'usage *élevage*. Le nombre d'animaux sur le territoire estimé en unité gros bétail (UGB) est multiplié par la consommation moyenne d'une UGB déterminée dans les études. Au vue de la proportion infime de la demande en eau de l'élevage par rapport aux autres usages du territoire montagnard, aucune distinction n'a été faite entre les consommations estivales et les consommations hivernales des UGB qui peuvent être différentes compte-tenu du fait que les troupeaux sont en alpage ou en fermage. La quantité faible d'eau consommée relative aux autres usages ne rend pas cette différence significative et n'a donc pas été représentée dans le modèle. Néanmoins comme pour chaque usage l'eau, le modèle est construit de manière à pouvoir ajouter autant de niveau de détail souhaité sur le calcul des demandes en eau. Cette différence de consommation saisonnière des UGB peut donc être incluse si nécessaire dans le calcul de la demande en eau de l'élevage.

De même, si l'usage agricole se définit en montagne principalement par de l'élevage comme décrit précédemment, rien n'empêche d'ajouter un module représentant un usage *culture* dans le modèle. Un tel usage pourrait représenter les besoins en eau d'un champ de maïs de superficie déterminée sur un territoire par exemple. De tels modules sont développés par l'INRA, entre autres études, comme par exemple le modèle STICS [[Brisson, 2008](#)]. Par ailleurs, [Bonriposi \[2013\]](#) a effectué une tentative d'utiliser la méthode MABIA du modèle WEAP [[Sahli et Jabloun, 2012](#)] pour quantifier les besoins en eau pour l'irrigation dans son analyse systémique et prospective des usages de l'eau du Valais Suisse. Il est donc tout à fait envisageable d'intégrer ce genre de module au modèle développé dans cette thèse pour un développement futur.

## E - IV Conclusion

A travers la description du modèle couplé le trait principal qui ressort est l'adaptabilité du modèle par rapport aux objectifs que l'on souhaite lui fournir. Cette adaptabilité se traduit à travers différents aspects.

Tout d'abord la conception du modèle en langage informatique orienté-objet permet d'ajouter des caractéristiques, des évolutions au modèle sans perturber l'ensemble du code. Il est donc modifiable aisément.

L'adaptabilité du modèle développé se traduit ensuite par la conception modulaire de celui-ci. En utilisant deux modules distincts dialoguant entre eux on s'affranchit de l'affiliation à un modèle hydrologique particulier. Le choix du modèle hydrologique constituant le module hydrologique ne contraint pas le fonctionnement du module anthropique. Ainsi, il est possible de tester plusieurs types de modèles hydrologiques et de récupérer un modèle hydrologique déjà créé sur un territoire, comme c'est le cas dans cette étude, pour construire le modèle couplé. Il est donc possible de capitaliser sur des modèles hydrologiques préexistants.

La construction par objets dans chaque module permet d'approfondir certains aspects jugés plus importants pour un territoire et d'en laisser d'autres à l'étape grossière soit parce qu'ils ne sont pas suffisamment sensibles par rapport à la problématique, soit par manque de données

nécessaires pour les compléxifier d'avantage. Néanmoins chaque objet décrit grossièrement peut être amené à être plus détaillé dans le futur si les données nécessaires deviennent disponibles ou si la problématique abordée est modifiée.

La conception de ce modèle s'est donc voulue adaptable au maximum afin de pouvoir être utilisée comme un outil évolutif d'aide à la planification ou à la prospective territoriale dans le domaine de la gestion de l'eau. Il doit être capable d'aider à développer des stratégies d'adaptation aux changements climatiques dans les milieux alpins. Afin de vérifier si cela est vraiment le cas, le modèle est appliqué à la station de sport d'hiver de Megève en Haute-Savoie (France). Les caractéristiques de cette application, ainsi que la description des résultats sont développées dans le chapitre suivant.



---

### Application du modèle à Megève

---

#### F - I Problématique de la gestion de l'eau à Megève

##### F - I - 1 Rapide historique de Megève

Megève est une municipalité de Haute-Savoie (France) (F.1) qui possède un domaine skiable depuis de nombreuses années [[Balseinte, 1959](#)].

Megève s'étend sur 44 km<sup>2</sup> et est considérée comme une station de ski de moyenne montagne avec des altitudes allant de 1100 m à 2500 m. La ville se développe sur un large plateau parcouru par plusieurs torrents dont la confluence forme l'Arly [[SCERCL, 2009](#)]. Le nom même de Megève est en lien avec cette position géographique particulière. Il aurait été attribué par le prieuré médiéval qui s'y installa : Medzève = medz, *medium* en latin, signifiant milieu et ève, *aqua* en latin, signifiant eau. Megève étymologiquement signifie donc au milieu des eaux.

Megève a toujours été considérée comme la municipalité la plus riche du Val d'Arly. Ses pentes douces et son ensoleillement remarquable ont très tôt permis l'installation humaine et une agriculture florissante ainsi que plus tard le développement du tourisme.

Comme dans la plupart des municipalités du massif alpin, la principale activité économique de Megève jusqu'au début des années 1950 est l'agriculture. [Balseinte \[1959\]](#) fait une description très intéressante du mode de vie des Mégevans avant l'arrivée du tourisme. C'est une vie rude fortement marquée par les saisons et l'isolement hivernal.

Très tôt, le tourisme se développe à Megève. La première mention relevée est en 1903, où Megève est désignée comme *station climatique*. On vante les bienfaits de l'air pur et un sanatorium

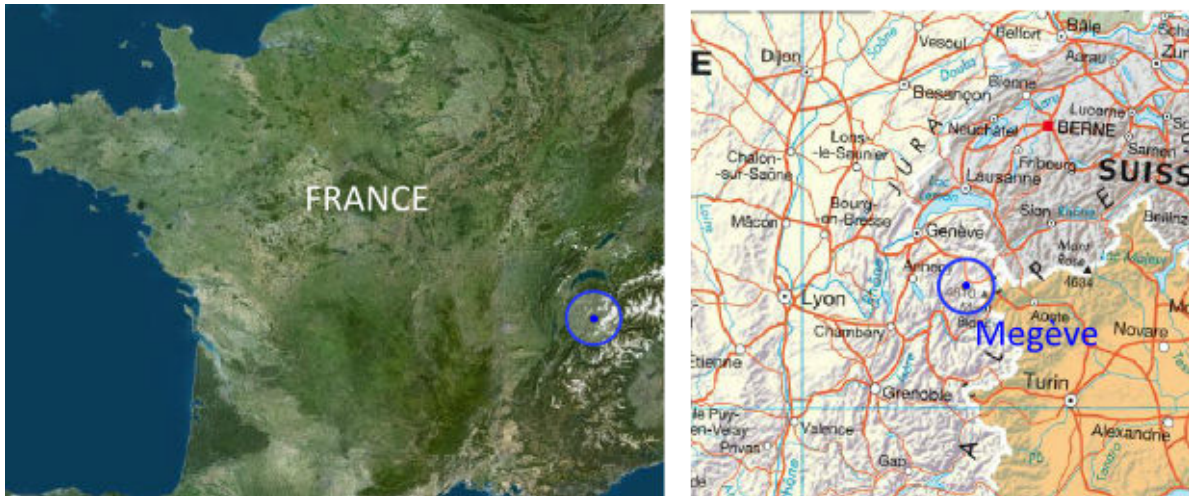


Figure F.1 – Megève une municipalité des Alpes françaises. *Source* : [www.geoportail.gouv.fr](http://www.geoportail.gouv.fr), modifié

est ouvert pour les enfants<sup>1</sup>.

Juste avant la première guerre mondiale, les premiers essors du ski se font à Megève mais dans un objectif purement sportif. Un temps interrompu par la guerre, le développement de cette activité reprend pendant l'hiver 1919-1920 avec un tourisme très mondain. C'est à cette période que sont construits les premiers hôtels. Megève est en pleine essor à ce moment et voit sa population augmenter rapidement ainsi que le nombre de ses hébergements. La clientèle est riche et mondaine, entraînée par la baronne de Roschteild qui a largement contribué à développer cette activité [Balseinte, 1959], [commune de Megève, 2007]. En 1957, Megève est la première station de ski en terme d'effectif de moniteurs. Elle possède 100 km de pistes.

Actuellement, Megève est une station de ski de renommée internationale plutôt orientée sur le haut de gamme. Elle dispose d'environ 45500 lits touristiques.

Avec l'essor du tourisme, l'émigration de Megevens vers les villes diminue et une forte immigration de travailleurs non Megevens apparaît. La population augmente donc rapidement. Elle est passée de 1750 habitants en 1911 à 4500 habitants en 2008. Ces dernières années la population reste plutôt constante avec une légère tendance à la baisse (figure F.2).

## F - I - 2 Le climat de Megève

Megève possède un climat typique montagnard caractérisé par des hivers froids et des étés frais et humides. Le diagramme ombrothermique de la figure F.3 montre bien ces caractéristiques avec des températures moyennes hivernales en-dessous de 0°C et les mois de mai, juin, juillet particulièrement pluvieux.

Le climat montagnard alpin est caractérisé par des précipitations abondantes. Megève reçoit en moyenne 1400 mm de précipitations par an. Les précipitations les plus abondantes sont au mois

1. [http ://patrimoine.rhonealpes.fr](http://patrimoine.rhonealpes.fr)

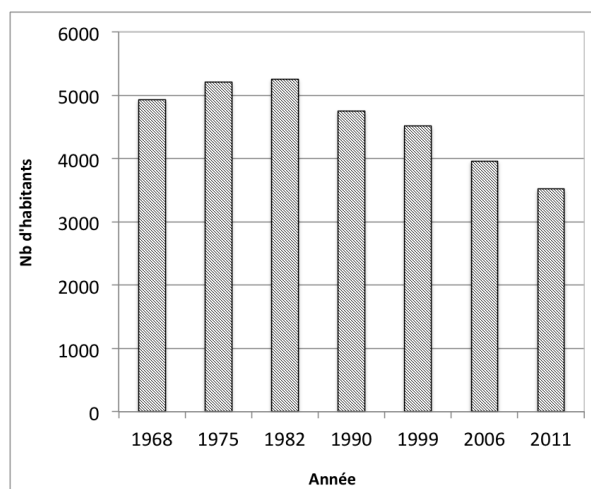


Figure F.2 – Évolution de la population de Megève entre 1968 et 2011 d'après les données INSEE

de décembre. Conjuguées avec les températures négatives ces précipitations hivernales tombent sous forme de neige.

L'accumulation de neige hivernale engendre un régime hydrologique de type nival (*cf.* figure F.3). Les débits les plus importants sont enregistrés d'avril à fin mai pendant la période de fonte des neiges.

Le régime hydrologique de Megève est caractérisé par deux périodes d'étiage distincts. Les mois de mi-août à mi-novembre présentent un premier étiage. La fonte des neiges est terminée et les précipitations sont encore faibles provoquant l'étiage, qui sera rompu par l'arrivée des précipitations automnales et de début d'hiver. Pendant la période d'étiage la plus sévère, les débits hydrologiques sont très peu supérieurs au débit réservé limitant grandement le prélèvement des ressources en eau du milieu naturel à cette période.

Le second étiage s'étend de janvier à février. Il est essentiellement lié aux températures négatives. Pendant janvier et février, les précipitations tombent sous forme de neige et les températures négatives ne permettent pas la fonte de celle-ci. Ainsi les écoulements liquides dans les rivières sont particulièrement faibles à cette période.

Ces caractéristiques spécifiques du climat montagnard sont à prendre en considération pour la saisonnalité des prélèvements par les usages de l'eau de Megève. Ces derniers sont présentés dans la partie qui suit.

### F - I - 3 Les activités socio-économiques de Megève

#### Le tourisme

Les activités socio-économiques de Megève sont fortement dominées par le tourisme depuis les années 1950. *Bonino et Elaphos* [2008] présentent succinctement le paysage touristique de Megève. La municipalité fait partie des *stations villages* caractérisées par un centre historique

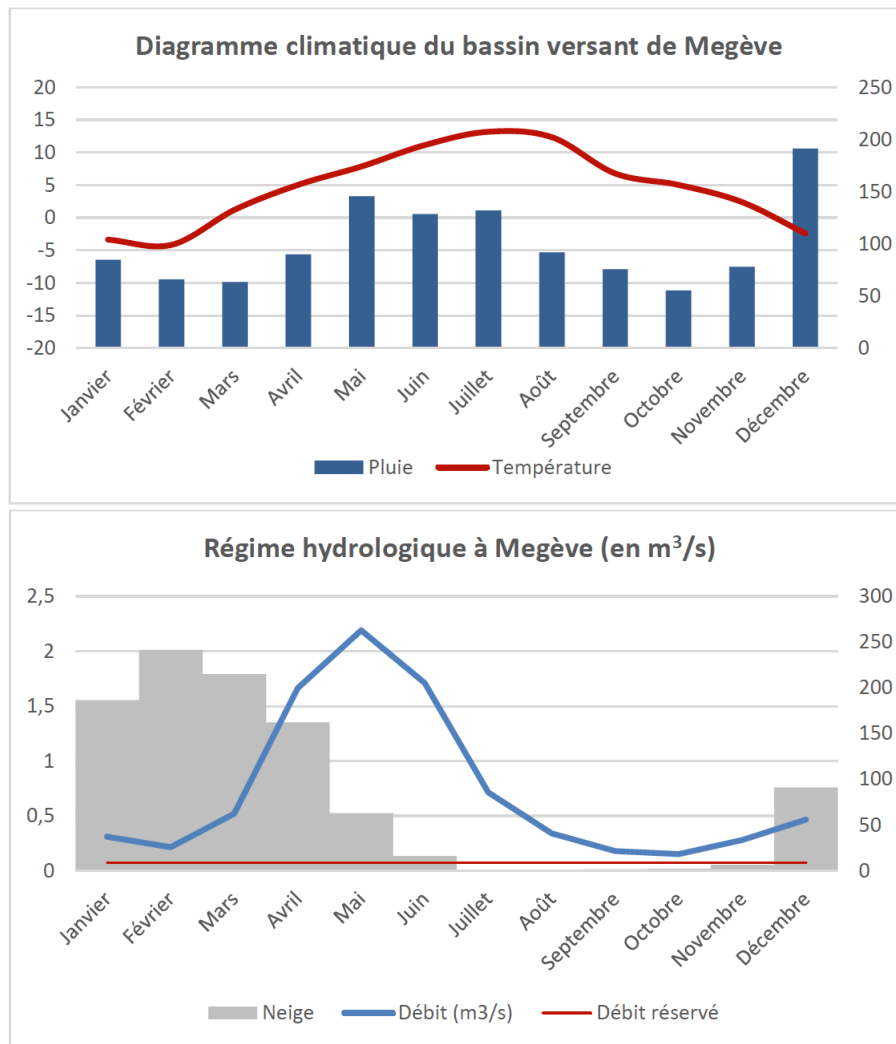


Figure F.3 – Diagramme ombrothermique (en haut) et régime hydrologique de Megève (en bas).  
Source : [Tenevia](#) [2014]

ancien avec des maisons traditionnelles, où se concentre une grande partie des commerces et services. Le domaine skiable de Megève se répartit sur trois massifs : Rochebrune, le Mont d'Arbois et le Jaillet. Le domaine est également relié à plusieurs autres stations comme Combloux ou Saint-Gervais pour former un plus grand domaine nommé "Evasion Mont-Blanc". Pendant l'hiver 2006-2007 900 000 journées skieurs ont été vendues sur le domaine de Megève. Le nombre de forfaits journées a augmenté et représente maintenant près de 45% des journées vendues. Cependant la clientèle journalière locale ne reste généralement pas sur place. Par ailleurs, la clientèle de séjour reste globalement stable. Megève cherche depuis des années à attirer une clientèle étrangère, basée sur le haut de gamme, afin de garantir le remplissage des hébergements.

Le tourisme d'été est également une activité importante de Megève puisqu'il représente encore 40% de la fréquentation touristique annuelle. Néanmoins, la clientèle d'été est en général de passage et les temps de séjour sont moins longs. De même les tarifs hôteliers sont moins importants l'été que l'hiver et la clientèle moins haut de gamme. Ainsi même si la fréquentation touristique estivale est importante par rapport à d'autres stations de montagne, les retombées économiques de la saison estivale restent bien inférieures à la saison hivernale.

D'un point de vue des équipements, Megève possède de nombreuses infrastructures dédiées au tourisme : piscine, patinoire, palais des sports, spa, golf, aéroclub, ainsi qu'un panel d'enneigeurs artificiels. Entre 45 500 et 48 000 lits touristiques [[commune de Megève, 2007](#)], [[régie des eaux Megève, 2013](#)] sont présents sur la commune faisant de Megève une des plus grandes stations touristiques du département. Les résidences secondaires représentent plus de 70% des lits touristiques et le positionnement «haut de gamme» de la commune est bien représenté par le fait que les 2/3 du parc hôtelier est classé en 3 et 4 étoiles [[commune de Megève, 2007](#)].

## L'agriculture

L'agriculture Mégevane est 100% liée à l'élevage avec la conception de fromage et la vente de viande labélisée "de montagne" et une mise en avant des circuits courts et de la qualité des produits locaux. En 2008 la commune compte 56 agriculteurs pratiquant l'élevage sur 4800 ha [[Bonino et Elaphos, 2008](#)]. La plupart des agriculteurs trouvent un complément de travail et de ressources dans les nombreux emplois offerts par les métiers du tourisme [[Balseinte, 1959](#)]. Parmi les particularités touristiques liées à l'agriculture, un troupeau d'une trentaine de bisons évoluent à 1700 m d'altitude sur le territoire de la commune.

Un abattoir est présent sur la municipalité. Un temps fermé, l'abattoir a été remis aux normes et réouvert en janvier 2013. Il est désormais le seul abattoir multi-espèces dans un rayon de 40 km. 650 unités gros bétail sont recensées sur la commune de Megève en 2007 [[commune de Megève, 2007](#)]. La commune est également située sur plusieurs aires géographiques de production fromagère ; l'Appellation d'Origine Contrôlée Reblochon, l'Indication Géographique Protégée Tomme de Savoie, l'Appellation d'Origine Contrôlée Chevrotin des Aravis et l'Appellation d'Origine Contrôlée Abondance [[Soraruff, 2012](#)].



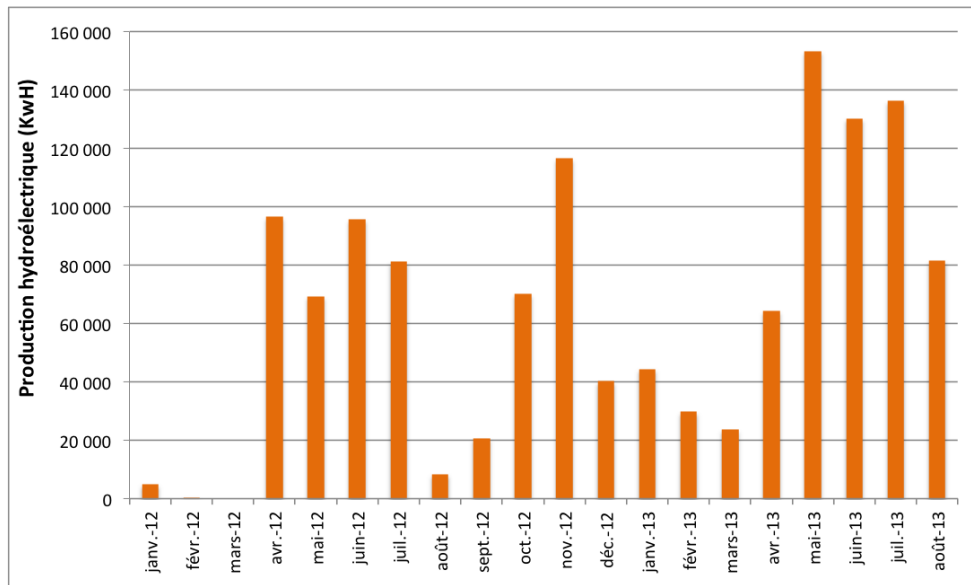


Figure F.4 – Production d'hydroélectricité de Megève en kWh (janvier 2012- août 2013). *Source* : [Tenevia, 2014]

## L'industrie

L'industrie de Megève est très peu développée. On peut citer la présence d'une scierie sur le territoire de la commune. Originellement, cette industrie du bois utilisait la force du torrent Arly pour fonctionner. Même si cette ressource n'est plus utilisée, certaines scieries sont encore en activité dont une à Megève.

Etant donné la très faible représentation de l'industrie de Megève, celle-ci n'est pas représentée dans le modèle développé pendant cette thèse même s'il pourrait très bien être pris en compte.

## L'hydroélectricité

Megève s'est équipée d'une petite centrale hydroélectrique en 1965 [Tenevia, 2012]. Cette dernière est installée à la sortie du réseau d'eau potable sous le palais des sports et permet de turbiner le trop-plein d'eau potable.

La turbine de Megève a un potentiel assez limité pendant les saisons touristiques puisqu'elle ne turbine que le trop-plein d'eau potable qui est faible pendant que la station accueille les vacanciers (figure F.4). Sa production permet néanmoins d'alimenter le palais des sports et ses équipements (piscine, patinoire, etc.) toute l'année [Tenevia, 2012].

## Organisation institutionnelle

Megève fait partie du Syndicat Intercommunal à Vocations Multiples (SIVOM) du Pays du Mont-Blanc regroupant 14 communes. Le SIVOM mutualise la gestion d'équipements adminis-

tratifs et sportifs. Il assure par exemple le transport scolaire sur les 14 communes adhérentes.

L'organisation des remontées mécaniques se fait sur deux institutions. La Société des Remontées Mécaniques (SEM) de Megève gère les domaines de Rochebrune et du Mont d'Arbois. Elle est monocommunale et détenue à 62% par la ville de Megève [[Bonino et Elaphos, 2008](#)]. Sa présidence est donc assurée par la commune. L'autre institution est la SEM du Jaillet qui gère le domaine du Jaillet. Elle est multicommunale et regroupe entre autres les communes de Megève, Combloux et La Giettaz sous forme d'un SIVU (syndicat intercommunal à vocation unique). Ce dernier est dirigé par le maire de Combloux.

La gestion de l'eau s'organise au sein d'une régie communale de 7 personnes. La régie est *responsable de la gestion des eaux destinées à la consommation humaine et la répartition de la ressource publique au profit des usages associés à l'eau tels que la production d'énergie, la fabrication de neige artificielle et la protection incendie* [[régie des eaux Megève, 2013](#)]. La régie des eaux de Megève est certifiée ISO 9001 depuis 2007.

Pour la gestion de l'assainissement et des eaux usées, la régie municipale est responsable de la collecte des eaux usées et assure la surveillance des installations individuelles d'assainissement ainsi que du réseau du particulier jusqu'à la station d'épuration. La station d'épuration par contre est gérée par un SIVU comprenant la commune de Megève et de Praz-sur-Arly. La station d'épuration se trouve d'ailleurs sur la commune de Praz-sur-Arly.

L'office du tourisme de Megève, est un organe important de la commune. Il est sous forme d'un EPIC (Établissement Public à caractère Industriel ou Commercial). Son rôle est de promouvoir le tourisme sur Megève. Son directeur est soumis à l'acceptation du maire.

L'ensemble de ces institutions a pour objectif de contribuer au développement et au bon fonctionnement de Megève notamment par une participation active dans les choix stratégiques de développement. Dès lors, si l'on souhaite contribuer à un développement durable de ce territoire, il est nécessaire de concevoir un outil dont les résultats sont utilisables et pertinents pour l'ensemble de ces institutions notamment pour favoriser un partage de l'eau efficace entre les différents usages de Megève.

#### F - I - 4 Partage de l'eau à Megève et dans GemEve

Megève possède quatre usages de l'eau principaux :

- hydroélectricité
- élevage
- neige de culture
- alimentation en eau potable

Si les ressources en eau annuelles de Megève sont abondantes, le partage de la ressource en eau entre ces quatre usages restent toujours une question prégnante. Un diagnostic de 2009 [[SCERCL, 2009](#)] établit qu'en cas de conjugaison extrêmement défavorables (c'est à dire l'étiage au même moment que la consommation touristique maximum), les ressources en eau de Megève

ne seraient pas suffisantes pour satisfaire tous les usages. L'hydroélectricité et la neige de culture seraient alors relayées au deuxième plan mettant en péril l'activité touristique hivernale.

L'impact du changement climatique sur les hydrosystèmes de montagne pourrait bien exacerber cette vulnérabilité (cf. chapitre B). L'application du modèle à Megève permettra d'observer la pertinence du développement d'un tel outil pour l'aide à la décision dans la gestion de l'eau dans un contexte de changement climatique.

Megève constitue donc un terrain d'étude intéressant pour l'application de ce modèle. De plus, ce site pilote de C3-Alps (cf. C - III page 43) est depuis plusieurs années un site d'études hydrologiques. Megève a été un site pilote du projet de l'Espace Alpin Alp-Water-Scarce où l'instrumentation du bassin versant et la conception d'un modèle hydrologique ont été réalisées. Suite aux Etats généraux de l'eau en montagne de 2010, un Observatoire de l'eau en montagne<sup>2</sup> a été créé. Cet organisme porté par la société d'économie alpestre et la Société d'Equipeement de la Haute-Savoie, aujourd'hui TERACTION, possède trois volets d'application : le partage de la ressource en eau, principalement étudié sur Megève, la préservation des zones humides, principalement étudié sur la commune des Gets et l'évolution des masses d'eau et des risques qui est un volet en cours d'émergence. Ainsi, grâce à ces différentes études en cours ou déjà réalisées sur Megève, un certain nombre de données est disponible ainsi que des partenariats avec les institutions en charge de la gestion de l'eau.

Megève est donc choisi pour toutes les raisons décrites précédemment comme terrain d'application du modèle couplé innovant associant modèle hydrologique et modèle anthropique. Ce modèle a pour objectif de montrer la possibilité de coupler efficacement ces deux modules, hydrologique et anthropique, et d'en éprouver l'utilité pour l'adaptation de la gestion de l'eau dans un contexte de changement climatique. Si le modèle développé s'appuie sur les caractéristiques et les données de Megève, il n'a pas pour objectif de simuler exactement et parfaitement le fonctionnement de la gestion de l'eau à Megève. De part un manque de données ou par choix algorithmique, les hypothèses développées et les données utilisées ne sont parfois pas le reflet exact de la réalité de Megève. Pour ces raisons nous nous référerons au modèle à travers l'appellation GemEve . Cette ville, non réelle, ressemble très fortement à Megève mais diffère sur quelques points. C'est pour bien marquer ces différences qu'un nom spécifique aux modélisations du modèle appliqué a été choisi. Ces différences seront détaillées tout au long de la présentation et de la discussion des résultats par la comparaison des simulations de GemEve avec la réalité de Megève.

L'ensemble des données disponibles et utilisées dans le modèle de GemEve sont présentées dans la partie ci-après.

**Rappel :** dans la suite de la présentation de l'application du modèle, celui-ci est mentionné sous l'appellation GemEve . Cette ville, non réelle, ressemble très fortement à Megève mais diffère sur quelques points (cf. paragraphe précédent).

---

2. [www.observatoire-eau-montagne.org](http://www.observatoire-eau-montagne.org)

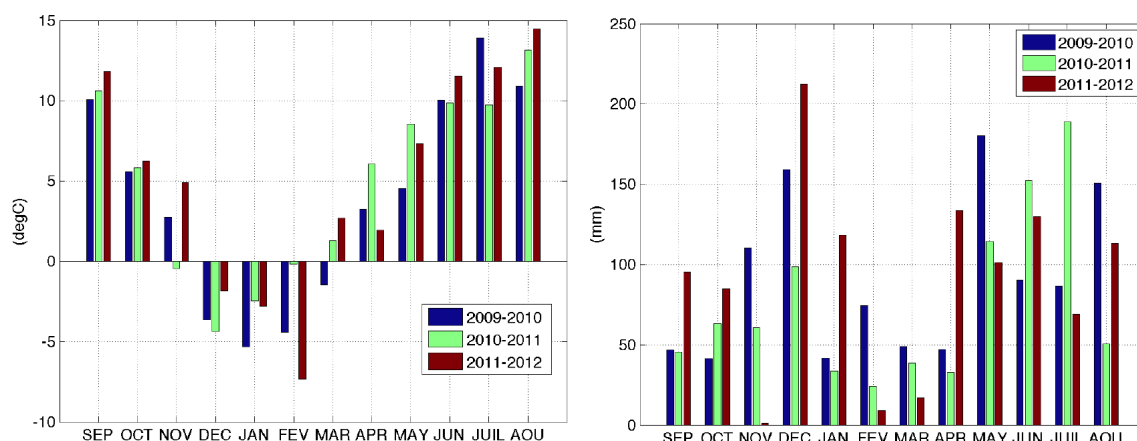


Figure F.5 – Températures (à gauche) et précipitations (à droite) moyennes enregistrées à Megève depuis 2009. Source : [Tenevia \[2012\]](#)

## F - II Les données utilisées

### F - II - 1 Les données hydro-météo

Le bassin versant de Megève est instrumenté depuis 2009 et le projet européen Alp-Water-Scarce. Le projet C3-Alps dans lequel s'inscrit cette thèse a poursuivi les travaux menés pendant Alp-Water-Scarce et a donc entretenu le relevé de données sur le bassin versant de Megève. Enfin, le projet Recharge-Green, sur le potentiel d'utilisation des énergies renouvelables a aussi contribué à l'analyse des données disponibles sur Megève. Le jeu de données utilisé pour C3-Alps est le même que celui utilisé par Recharge-Green. Ainsi par commodité nous reproduirons les graphes présentés dans le rapport [[Tenevia, 2012](#)] réalisé pour le compte-rendu de Recharge-Green.

Le réseau de mesures hydro-météorologiques mis en place sur le bassin de versant de Megève comprend 5 stations hydrométriques, 2 appareils photographiques utilisés pour estimer la quantité de neige, 4 stations météorologiques enregistrant les températures et les précipitations et enfin 8 capteurs de température de type iButton. L'ensemble de ces données sont utilisées pour construire le modèle hydrologique utilisé dans le module représentant le milieu naturel.

La figure F.5 présente le bilan de trois années de mesures de 2009 à 2012 sur le bassin versant de Megève. Ces données montrent qu'en moyenne les 3 mois d'hiver (décembre, janvier, février) enregistrent des températures négatives favorisant l'accumulation de neige dans le bassin versant. Parallèlement les précipitations de janvier, février et mars sont les plus faibles de la période enregistrée. Le mois de décembre présente des précipitations importantes qui conjuguées à la température négative de ce mois peuvent générer une quantité de neige significative permettant l'ouverture du domaine skiable de Megève.

Des données de débits mesurées par les différentes stations de mesures hydrométriques ont également été utilisées pour mettre en œuvre le modèle hydrologique sur Megève (cf. figure F.6).

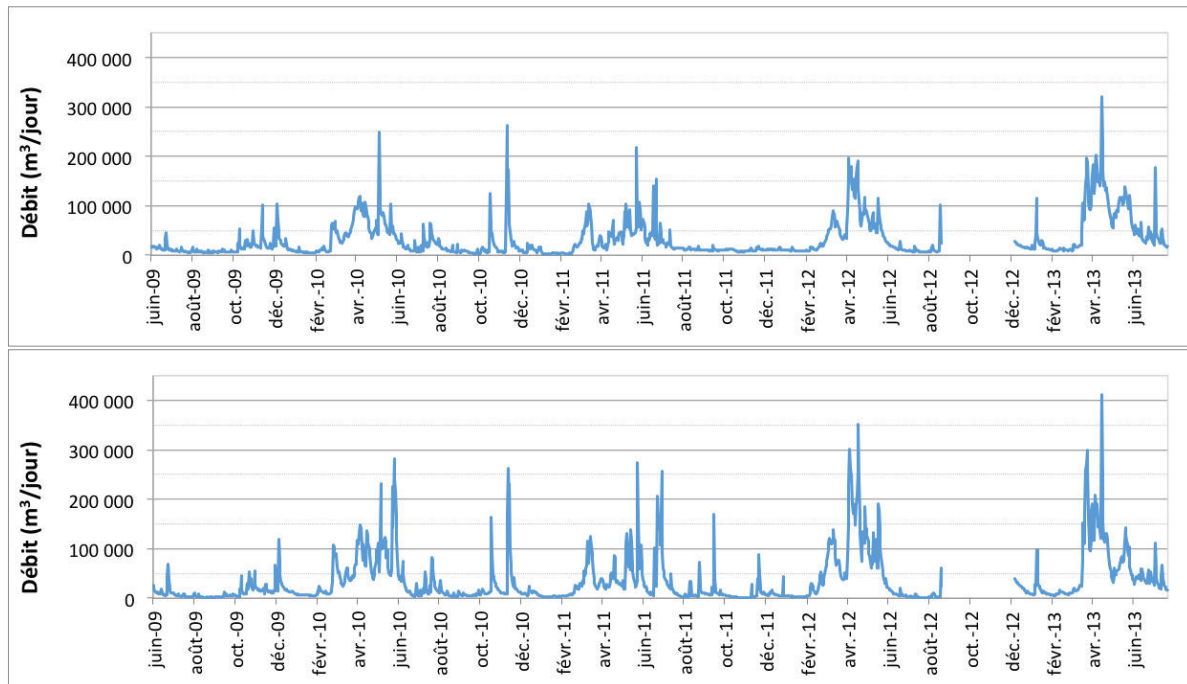


Figure F.6 – Débits mesurés pour le bassin de versant sur le Glappet (en haut) et le Planay (en bas) de juin 2009 à juillet 2013 en m<sup>3</sup>/jour, noter une absence de mesure entre mi-septembre 2012 et décembre 2012. *Source* : [Tenevia \[2014\]](#), modifié

L'ensemble de ces données ont permis la construction du modèle hydrologique (non réalisé pendant cette thèse) représentant le milieu naturel. Ce sont les sorties du modèle hydrologique qui sont réutilisées dans ce modèle et qui entrent en interaction avec le module anthropique. Deux sorties principales du modèle hydrologique sont utilisés : les quantités de neige simulées sur le bassin versant et les débits à l'exutoire de Megève.

La figure F.7 synthétise les données climatiques utilisées pour le modèle hydrologique et présente la simulation de neige générée sur le bassin versant en fonction de ces données. Les quantités de neige naturelle simulées par le modèle hydrologique sont utilisées pour le calcul de la demande en eau de l'objet neige de culture.

Pour ce qui est des débits naturels simulés, leur utilisation dans le module anthropique a fait l'objet d'une adaptation. En effet, le modèle développé dans cette thèse est construit de manière à pouvoir intégrer des sorties de modèles hydrologiques distribués (*cf.* chapitre D). Pour l'application du modèle à Megève, les simulations hydrologiques disponibles réalisées par Tenevia pour le projet Recharge-Green représentent les débits journaliers à l'exutoire du torrent du Planay et du Glapet. Or les captages étant à l'intérieur du bassin versant, pour estimer les débits naturels à ces endroits particuliers nous avons fait l'hypothèse que les débits spécifiques calculés aux exutoires des deux bassins étaient homogènes sur l'ensemble de ces bassins. On peut certes discuter cette hypothèse mais elle semble réaliste compte tenu de la petite taille de ces bassins. En outre on notera que sous réserve d'acceptabilité de cette hypothèse, cela signifie qu'il n'est pas nécessaire de disposer de modèles hydrologiques fonctionnant à l'échelle du pixel MNT.

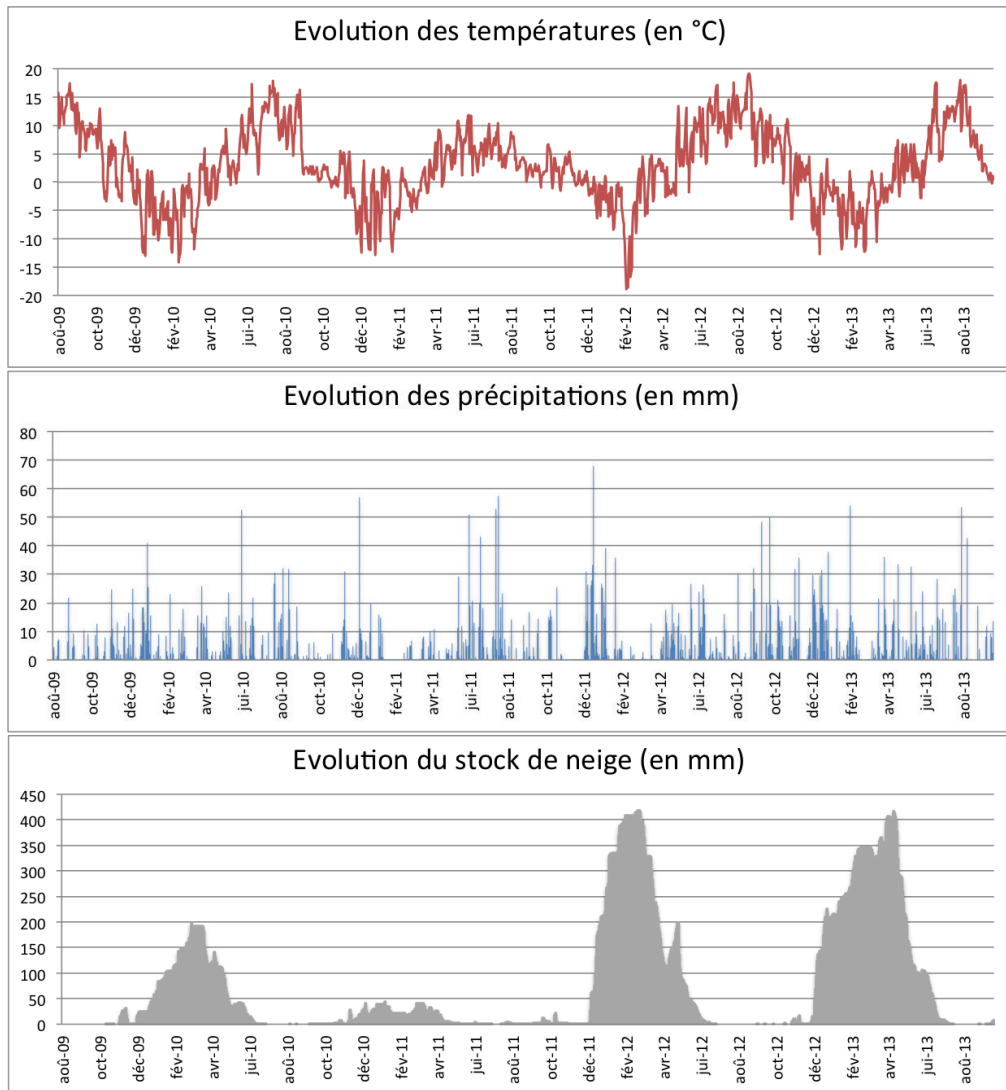


Figure F.7 – Évolution des température, précipitations (mesurées) et du stock de neige (simulé) à Megève de 2009 à 2013. Source : [Tenevia \[2012\]](#), modifié

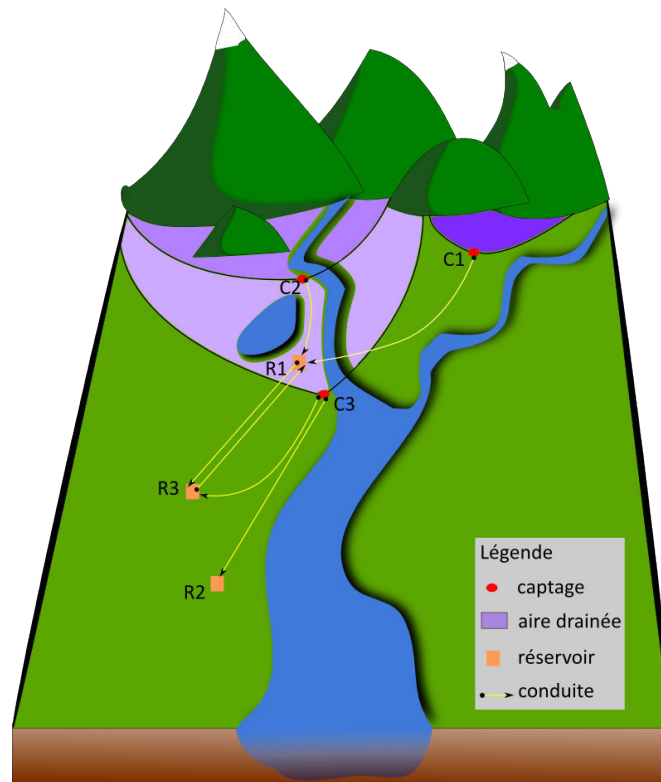


Figure F.8 – Représentation des aires drainées par captage dans le modèle

Plus concrètement, le débit à l'exutoire du bassin versant est divisé par l'aire totale du bassin versant, fournissant un débit par  $\text{m}^2$ . Ce débit est multiplié pour chaque captage par l'aire drainée du captage (figure F.8). On obtient ainsi le  $Q_{nat}$  potentiellement prélevable dans le captage. Cette valeur peut aussi être perçue comme la quantité d'eau naturelle maximale prélevable au milieu naturel à l'endroit du captage.

L'aire drainée est calculée grâce au MNT utilisé dans le module hydrologique. La précision de son estimation dépend donc de la précision du MNT. Lorsque des métadonnées sur le captage étudié sont disponibles, comme le débit moyen, le  $Q_{nat}$  estimé à l'entrée de chaque captage est comparé à cette donnée afin de réduire le degré d'incertitude lié à l'estimation.

Dans ce schéma le module anthropique interroge donc à chaque pas de temps le module naturel pour connaître les débits naturels au droit des captages. Par contre, si la régie des eaux virtuelle prélève de l'eau au milieu naturel, cette quantité ne se propage plus dans le réseau hydrographique à l'aval des captages. Le module anthropique informe donc en retour le module naturel qui soustrait de ces débits naturels aval les quantités d'eau prélevées à l'amont (par exemple les captages C2 et C3 de la figure F.8). La topologie du réseau hydrographique, c'est à dire les positions relatives des captages de l'amont vers l'aval ainsi que leur connections au réseau hydrographique naturel, est donc prise en compte.

## F - II - 2 Les données anthropiques

## La régie des eaux

La régie des eaux est l'organe de gestion de l'eau de Megève (*cf.* section F - I - 3 ). Grâce au partenariat entre l'Observatoire de l'Eau en Montagne et la Régie des Eaux, un certain nombre de données nous ont été transmises. Parmi elles les RPQS (Rapport Public sur la Qualité de l'eau et des Services) de 2010, 2011, 2012 et 2013. Ces rapports sont produits tous les ans par chaque service d'eau et d'assainissement pour rendre compte aux usagers du prix et de la qualité du service rendu pour l'année écoulée<sup>3</sup>. Ils établissent donc l'état des lieux à la fin de l'exercice. Nous avons utilisé ces documents pour déterminer les caractéristiques du réseau d'alimentation en eau et pour comparer les volumes annuels produits et consommés.

## Réseau d'alimentation en eau

L'organisation du réseau distingue captages et réservoirs. Pour les captages nous disposons des métadonnées suivantes :

- localisation
- débit minimum ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
- débit moyen ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
- débit maximum ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
- puissance des pompes s'il s'agit d'un forage ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
- lieu de stockage de l'eau prélevée (*i.e.* réservoir(s) associé(s))
- informations sur la nature du captage (*e.g.* captage de secours)

Pour les réservoirs, les métadonnées connues sont les suivantes :

- capacité de stockage ( $\text{m}^3$ )
- la liste des captages et réservoirs sources
- informations diverses (*e.g.* débit des conduites à double sens)

Les RPQS font également référence aux volumes captés et aux volumes consommés pendant l'année du rapport. Ces données se présentent sous forme de tableau où chaque distribution (*i.e.* consommation) est référée en  $\text{m}^3$  (tableau F.1). Ces données seront utilisées pour comparer les consommations et distributions modélisées par le modèle avec celles mesurées sur le terrain.

Au delà des données présentes dans le RPQS, la Régie des eaux (via l'Observatoire de l'Eau en Montagne) nous a également fourni un fichier de distribution d'eau horaire provenant des deux principaux captages de la municipalité (la Radaz et le Planay) et du réservoir central (la Livraz). Ces données en  $\text{m}^3/\text{h}$  peuvent fournir une comparaison au même pas de temps horaire que le modèle développé. Néanmoins, la régie des Eaux nous a mis en garde sur la mesure des captages

3. Pour plus d'informations sur le RPQS consulter <http://www.services.eaufrance.fr/observatoire/rpqs>



Table F.1 – Données de synthèse sur les distributions annuelles d'eau (m<sup>3</sup>) présentées dans les Rapports Publics sur la Qualité de l'eau et des Services (RPQS) de Megève. *Source* : Régie des Eaux de Megève via l'Observatoire de l'Eau en Montagne

	2010	2011	2012	2013
Abonnés domestiques	499 186	605 658	545 042	543 360
Bassins de comptages et bornes de puisage	19 682	14 782	79 077	50470
Turbine	2 046 460	1 334 523	1 323 345	2 264198
Neige (prélevé AEP)	162 004	36 378	102 233	69 127
volumes techniques (estimation)	13 960	13 899	13 836	13 668
pertes (estimation)	326 851	479 007	567 793	361 066
Total distribuée	3 068 143	2 484 247	2 631 326	3 301 889

du Radaz et du Planay effectuée par des sondes peu fiables. Aussi tout comme les techniciens de la Régie des eaux, nous avons utilisé uniquement les données de distribution du réservoir de la Livraz (mesurées par un compteur) pour comparer nos résultats. Ces données sont disponibles du 01/11/2010 au 01/09/2014 au pas de temps horaire.

Des mesures de production hydroélectrique ont également été utilisées. Ces données sont disponibles à un pas de temps de 15 min pour l'année 2011, 2012 et 2013. La figure F.9 montre que la production hydroélectrique de Megève a une variabilité intra-annuelle et inter-annuelle forte. Ainsi en 2013, près de 2 227 000 m<sup>3</sup> ont été turbinés contre 1 325 000 m<sup>3</sup> en 2012.

Le débit maximum de la turbine est de 600 m<sup>3</sup> d'eau par heure. Cette valeur a été utilisée pour modéliser le fonctionnement de l'usage hydroélectricité dans GemEve ainsi qu'un seuil d'arrêt de turbinage, correspondant à 94% du remplissage du réservoir de la Livraz. Ce seuil correspond aux pratiques réalisées sur Megève. Concrètement la Régie des eaux impose l'arrêt de la turbine lorsque le réservoir principal de la Livraz est en dessous de 94% de son volume stocké maximum.

### Données Touristiques

Pendant cette étude, nous n'avons pas pu obtenir de données de fréquentation touristique auprès de l'office du tourisme ou de la mairie de Megève. Cela vient en partie du fait que contrairement à la Suisse, les professionnels du tourisme n'ont pas d'obligations de fournir des informations sur leurs taux de remplissage. Il faut également mettre en avant le caractère souvent jugé sensible par les municipalités de ces données de fréquentation. Aussi, de nombreuses études sur la gestion de l'eau pointent les difficultés à obtenir ce type données [ACQWA, 2013], [Bonriposi, 2013], etc.

Seuls quelques éléments quantitatifs sont à notre disposition pour constituer une chronique mensuelle de touristes :

1. 900 000 journées skieurs ont été vendues pendant l'hiver 2006/2007 dont 40% sont des forfaits uniquement journée [Bonino et Elaphos, 2008]
2. pendant la semaine de Noël et du jour de l'an, la station de Megève est pleine, c'est à dire que

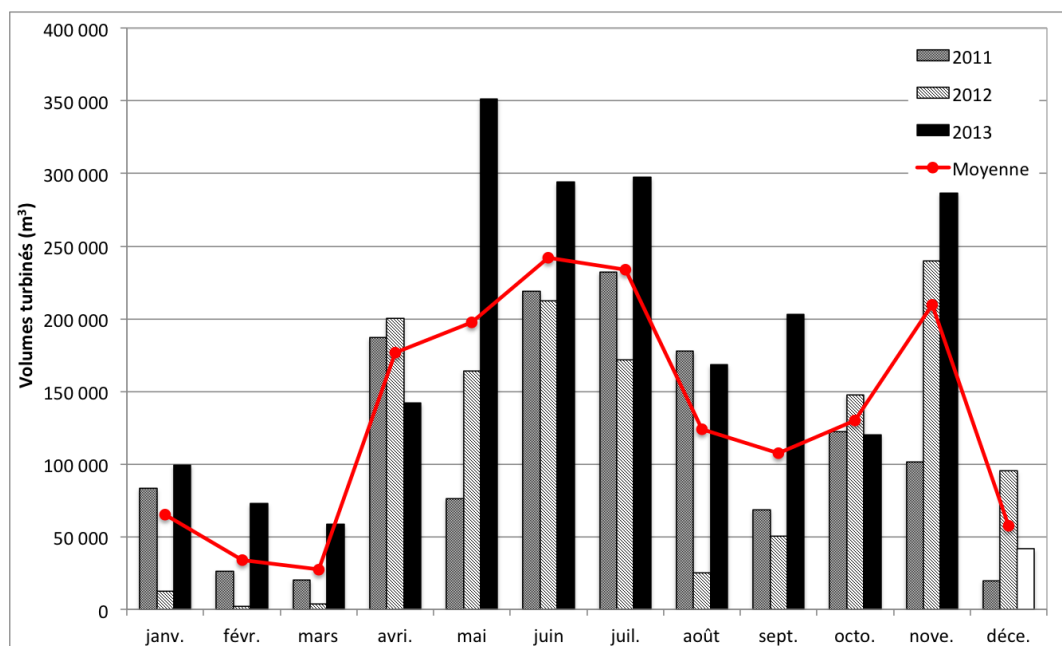


Figure F.9 – Consommations (m³) de la turbine hydroélectrique de Megève pour 2011, 2012 et 2013. Le mois de décembre 2013 est incomplet (arrêté au 10 décembre 2013) et n'est donc pas pris en compte dans la moyenne (en rouge).

les 45 500 à 48 000 lits touristiques (selon les sources) sont occupés toute la semaine

3. Megève est une station touristique dont 40% de la fréquentation touristique s'effectue en été [Bonino et Elaphos, 2008]
4. Le volume annuel d'eau délivré pour les abonnés domestiques par la régie des eaux est de 550 000 m³ en moyenne sur les quatre années disponibles (RPQS 2010, 2011, 2012 et 2013 cf. tableau F.1). En retirant la consommation des 3516 habitants annuels et des 650 bovins, on obtient environ 330 000 m³ d'eau distribuée pour l'AEP touristique en un an. Considérant la consommation d'une personne à 150L/j une estimation d'environ 2 200 000 touristes par an de Megève est effectuée.

Fort de ces informations annuelles, nous avons ventilé les nuitées touristiques autour des semaines de vacances académiques considérant qu'elles constituent le noyau des fréquentations saisonnières et nous nous sommes attachés à respecter au mieux les conditions présentées ci-dessus. Les résultats de cette reconstruction empirique de la fréquentation touristique sont présentés dans la figure F.10 et les principaux éléments clés dans le tableau F.2.

L'analyse des valeurs clés du tableau F.2 et la comparaison de l'allure de la chronique de touristes reconstituée avec les données de l'INSEE sur la fréquentation touristique des hébergements collectifs en Rhône-Alpes<sup>4</sup> et du profil de l'emploi saisonnier touristique dans les Alpes<sup>5</sup> (figure F.11). attestent de la cohérence de la reconstitution de la courbe par rapport à la réalité de la

4. [www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg\\_id=7&ref\\_id=19695](http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=7&ref_id=19695) &page=six\_pages/6p\_n150/6pages\_n150\_pages2.htm dernier accès le 21 mars 2015

5. [http://insee.fr/fr/themes/document.asp?reg\\_id=1&ref\\_id=17857](http://insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=1&ref_id=17857) dernier accès le 21 mars 2015

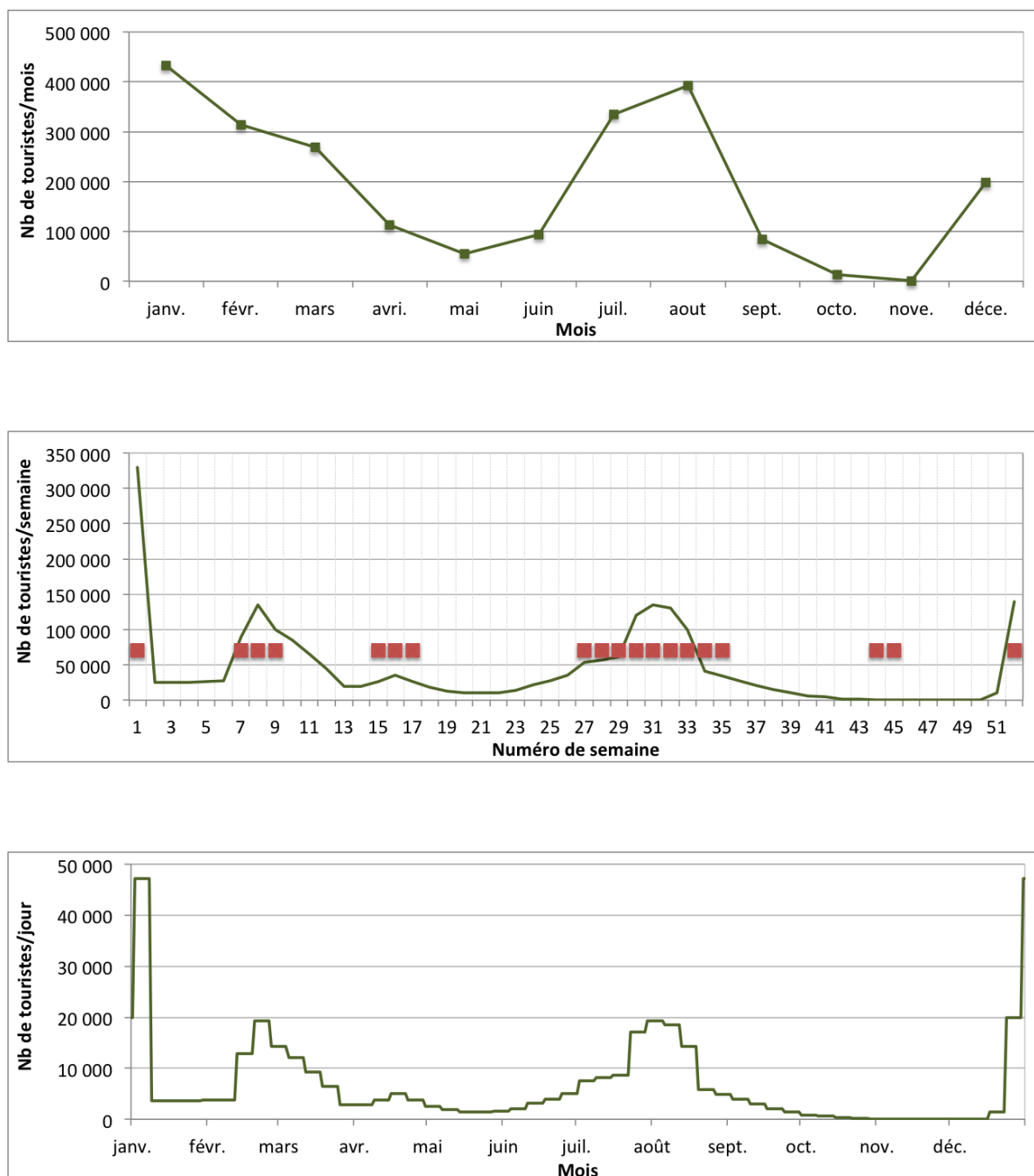


Figure F.10 – Reconstitution d’une chronique touristique typique d’une station de sport d’hiver de moyenne montagne à partir d’éléments annuels et des semaines de vacances académiques françaises (2012) ; en haut : nombre de nuitées touristiques mensuelles, au centre : nombre de nuitées touristiques par semaine (semaines de vacances académiques en rouge), en bas : nombre de nuitées touristiques par jour.

Table F.2 – Valeurs clés de la reconstruction de la chronique de touristes pour GemEve

Nombre de nuitées touristiques annuelle	2 230 000
Nombre de nuitée maximale pour une journée	47 000
Fréquentation touristique hiver (décembre, janvier, février, mars, avril )	61%
Fréquentation touristique été (juin, juillet, août, septembre)	36%
Fréquentation touristique hors saison (mai, octobre, novembre)	3%

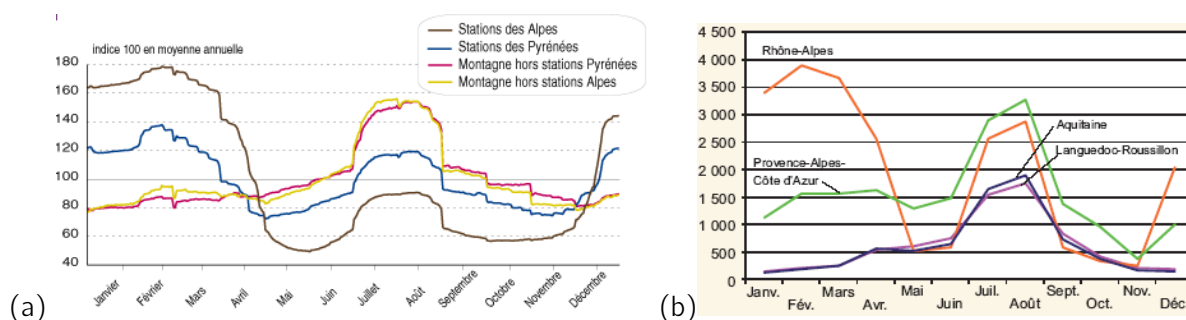


Figure F.11 – Éléments de comparaison pour la validation de la reconstitution de la chronique touristique ; (a) profil saisonnier de l'emploi salarié touristique par type d'espace touristique en 2009 (b) nombre de nuitées dans les hébergements collectifs en Rhône- Alpes (courbe orange) par mois pour 2010 (en millier de nuitées). *Source* : [www.insee.fr](http://www.insee.fr)

fréquentation touristique observée sur le terrain avec un pic de fréquentation pendant les mois d'hiver (décembre, janvier, février, mars) et les mois d'été (juin, juillet août). Ainsi nous utiliserons la chronique des touristes reconstituée présentée ici comme donnée d'entrée pour la mise en œuvre du modèle développé.

### Remontées mécaniques

De manière similaire à la collaboration avec la Régie des eaux une collaboration avec la SEM de Megève a permis le transfert de plusieurs données.

Mensuellement et depuis 2011, l'ensemble des volumes d'eau utilisés pour faire de la neige de culture sur le domaine de Rochebrune a été fourni. Les volumes d'eau prélevés (en m<sup>3</sup>), leur répartition par massif (distinguée en 2 zones : Rochebrune et Côte 2000) ainsi que leur provenance (captage, ruisseau de fontaine ou trop-plein de l'eau potable ) sont renseignés.

Un entretien réalisé avec les gérants de la SEM de Megève en juin 2014 a également permis de recueillir les informations nécessaires quant aux pratiques de l'enneigement artificiel à Megève (température seuil à partir de laquelle les enneigeurs se déclenchent, débit maximum des enneigeurs, etc.).

## F - III Mise en œuvre du modèle

Les résultats présentés dans cette section utilisent les données décrites dans la section F - I . Les simulations sont réalisées au pas de temps horaire du 8 août 2009 au 19 septembre 2013. Ces simulations correspondent aux sorties du module hydrologique disponibles au moment de la mise en œuvre du modèle.

Les résultats du modèle sur GemEve sont comparés, lorsque des données sont disponibles, à des observations faites par la régie des eaux, par la société de remontées mécaniques et par toutes autres études disponibles sur Megève. Ainsi, il est possible de vérifier que les hypothèses réalisées pour simuler GemEve peuvent permettre de bien simuler la gestion des ressources en eau d'une station de ski réelle ayant des caractéristiques proches.

### F - III - 1 Résultats globaux

La figure F.12 présente les résultats globaux du modèle sur trois années calendaires complètes (2010, 2011, 2012). Grâce aux données annuelles de la régie il est possible de comparer les volumes distribués pour chaque usage de l'eau dans GemEve par rapport à ceux de Megève c'est à dire : l'hydroélectricité, les abonnements domestiques (qui comprennent l'AEP locale, l'AEP touristique et les consommations pour l'élevage) et la neige de culture. Les volumes techniques et les pertes estimées par la régie des eaux (cf. tableau F.1) ont donc été retirés du total distribué par la régie.

Le tableau F.3 permet de mieux visualiser les écarts grâce aux valeurs chiffrées. D'un point de vue général on peut affirmer que le modèle GemEve fonctionne correctement et parvient à modéliser de manière effective l'ensemble des usages de l'eau. L'erreur moyenne sur l'ensemble des volumes consommés sur les trois années est de -3% en prenant en compte l'hydroélectricité dans le total et de 1% lorsque celle-ci est retirée du total. La figure F.12 montre bien les fortes variations annuelles dues à l'hydroélectricité que GemEve ne semble pas représenter parfaitement. Néanmoins l'allure des cumuls annuels des usages semble cohérente avec la réalité de Megève.

Le bilan de l'usage neige artificielle est présenté de deux manières dans le tableau F.3 : par année et par hiver. En effet les gestionnaires des stations de ski raisonnent plus par saison de production de la neige (de novembre à mars) que par année calendaire. Ainsi on peut observer que sur l'année calendaire l'erreur moyenne sur les trois années de l'usage neige artificielle est de -3% avec une erreur annuelle fluctuant entre -21% et 30%. Lorsque les différences par hiver sont analysées, l'erreur moyenne sur les trois hivers est très faible (0.3%) avec une variation de l'erreur annuelle de -17% à +17%. Une analyse plus approfondie de ces résultats ainsi que ceux des autres usages est proposée ci-dessous.

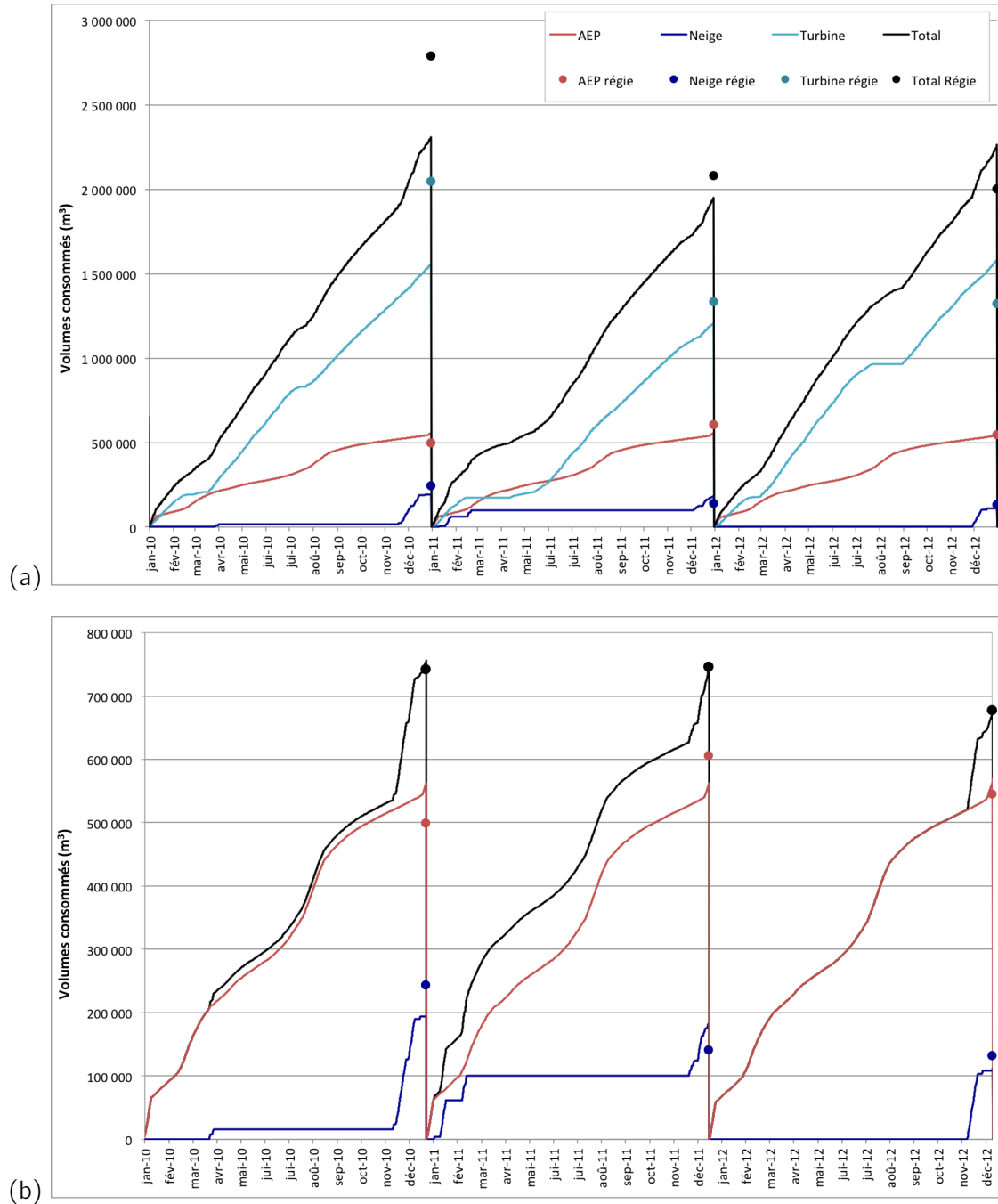


Figure F.12 – Comparaison entre les cumuls annuels consommés par usage en m³ modélisés dans GemEve (courbes) et les données annuelles de la régie des eaux (points) pour 2010, 2011 et 2012 pour l'ensemble des usages (a), et l'ensemble des usages sans l'hydroélectricité (b)

Table F.3 – Différences entre les volumes modélisés par GemEve et les volumes mesurés par la Régie des Eaux (en m<sup>3</sup>)

(a) Avec prise en compte de l'hydroélectricité

Année	Total	%	Abonnés	%	Neige Artificielle	%	Hydroélectricité	%
2010	-478 463	-17%	63 562	13%	-49 913	-21%	-492 113	-24%
2011	-127 384	-6%	-42 910	-7%	42 332	30%	-126 806	-10%
2012	264 635	13%	25 485	5%	-28 228	-15%	259 209	20%
Moyenne	-113 737	-3%	15 379	3%	-11 936	-3%	-119 903	-5%

(b) Sans prise en compte de l'hydroélectricité

Année	Total	%	Abonnés	%	Neige Artificielle	%
2010	13649	2%	63 562	13%	-49 913	-21%
2011	-578	0%	-42 910	-7%	42 332	30%
2012	5426	1%	25 485	5%	-28 228	-15%
Moyenne	6166	1%	15 379	3%	-11 936	-3%

(c) Présentation spécifique de la neige par hiver

Hiver	Neige Artificielle	%
2010/2011	40 627	17%
2011/2012	-16 992	-17%
2012/2013	-22 328	-17%
Moyenne	1 307	0.3%

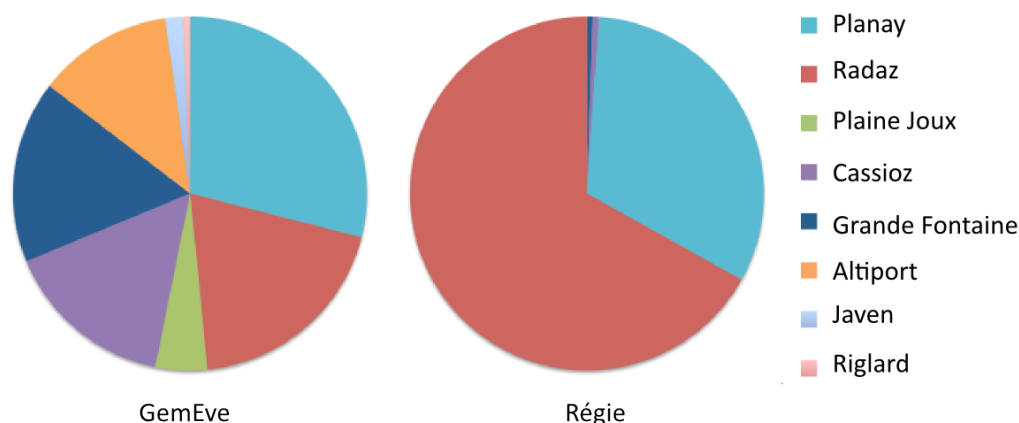


Figure F.13 – Répartition de la distribution d'eau par captage de GemEve (à gauche) et de la régie des eaux de Megève (à droite)

## F - III - 2 Distribution des captages et réservoirs

La figure F.13 présente les distributions d'eau des captages de GemEve comparées aux distributions des captages enregistrés par la régie des eaux de Megève. On observe que même si GemEve a été construit grâce aux caractéristiques du réseau d'alimentation en eau de Megève, la répartition des distributions entre captages n'est pas similaire.

Dans GemEve, l'hypothèse est qu'un réservoir se remplit de manière égale entre ses captages et réservoirs sources à partir du moment où ces derniers disposent de suffisamment d'eau. En comparant cette distribution avec les données annuelles de la Régie des eaux, il apparaît que cette règle de gestion n'est pas celle appliquée sur le terrain.

Cette divergence montre qu'avec une architecture de réseau ayant des caractéristiques similaires (débit maximum de prélèvements, capacité de stockage, lieu de prélèvement, etc.) et des activités socio-économiques proches, il existe au moins deux possibilités pour satisfaire les besoins du territoire. Différents types de règles sont donc envisageables pour la gestion durable de l'eau. Dans le cas présent, il existe sûrement des règles propres à la régie des eaux de Megève pour favoriser le prélèvement d'eau dans la Radaz par rapport aux autres disponibles.

Ce résultat est particulièrement intéressant pour optimiser la gestion actuelle. En effet, il serait possible d'interroger le modèle afin que celui-ci définisse la répartition idéale entre les distributions des captages et des sources pour optimiser la satisfaction des usages tout en respectant les règles de priorité et de débits minimaux. Ce travail n'a pas été réalisé dans la thèse mais présente un intérêt majeur à être étudié par la suite.



### F - III - 3 Consommations d'eau par les différents usages

#### Ensemble des consommations d'usages

La figure F.14 présente les résultats mensuels moyens sur les trois années étudiées des consommations d'eau par les différents usages. Au premier abord on peut observer sans surprise que les demandes en eau sont plus fortes pendant les périodes touristiques en particulier en hiver au mois de décembre et janvier. En deuxième analyse, on constate que la consommation d'eau pour l'hydroélectricité est responsable de près 70% des consommations mensuelles. Certains mois comme octobre c'est plus de 85% de la consommation mensuelle qui est due à la centrale hydroélectrique. Ce phénomène est cohérent avec les constatations faites sur d'autres terrains (e.g. [Charnay, 2010]) et les données annuelles relevées dans les RPQS de la régie (estimation de 73% de consommation totale annuelle par la turbine). Durant les mois à forte concentration touristique, la part prise par la centrale diminue pour atteindre entre 40 et 50% de la consommation totale.

La répartition mensuelle des consommations de la turbine est plus homogène dans le modèle GemEve par rapport à la réalité observée sur Megève (figure F.15). Néanmoins, le modèle présente des variations inter-annuelles et intra-annuelles comme dans la réalité de Megève. On observe qu'un pic de production d'hydroélectricité n'est pas représenté dans GemEve par rapport à Megève. Ceci est certainement dû au fait que pendant le mois de novembre, beaucoup d'habitants prennent des congés avant la saison hivernal (information de la régie des eaux). Il y a donc moins de population permanente dans Megève, alors que la population de GemEve reste constante toute l'année. Puisque moins d'eau est utilisée pour l'eau potable, plus d'eau peut être turbinée.

De même les consommations plus basses de la turbine de Megève pendant l'hiver par rapport à GemEve peuvent s'expliquer par une consigne propre à la régie des eaux qui est de couper la turbine avant les périodes de vacances académiques pour prévenir d'éventuelles pénuries. Cette consigne non représentée dans GemEve vient donc minimiser les débits potentiellement turbinaux de ces mois d'hiver. Néanmoins sans la représentation de ces caractéristiques particulières, GemEve représente la consommation d'hydroélectricité de Megève avec une erreur moyenne sur trois années de -5% avec un maximum de -25% d'erreur en 2010. Ainsi, sans posséder l'ensemble des éléments de fonctionnement de la turbine de Megève, GemEve permet une représentation plausible de l'hydroélectricité d'une commune de montagne. Si l'ensemble des pratiques d'hydroélectricité de Megève est explicité et introduite dans le modèle développé, il est donc très probable que les volumes consommés par la turbine dans GemEve soient similaires à ceux de Megève.

Ces différences peuvent venir également de l'incertitude sur des simulations de consommations des autres usages. En effet la turbine de GemEve est simulée de manière à turbiner le trop plein d'eau potable. Ainsi elle dépend de la justesse de simulation des autres usages que sont l'alimentation en eau potable, l'agriculture et la neige artificielle. De même, l'incertitude sur le modèle hydrologique joue un rôle dans l'erreur sur les volumes turbinés.

Les consommations de la turbine ayant un poids trop prépondérant dans les consommations globales, ces dernières sont retirées des analyses suivantes afin de mieux observer la représentation

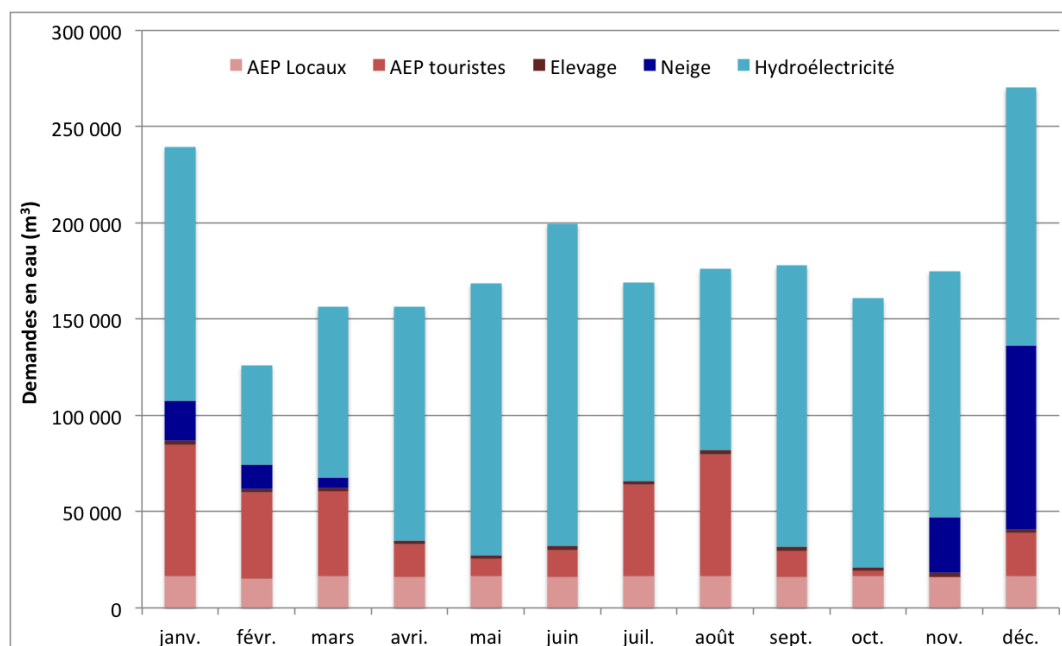


Figure F.14 – Demandes en eau mensuelles moyennes (m³) dans GemEve

des usages restants dans GemEve .

### III - 3 - a Ensemble des consommations d'usages sans hydroélectricité

Sur la figure F.16, on constate que la demande en eau annuelle est très majoritairement due aux consommations durant les saisons touristiques définies comme suit :

- La saison touristique d'hiver correspond à la période de pratique des sports d'hiver, soit les mois de décembre, janvier, février, mars et avril représentant donc 42% de l'année
- La saison touristique d'été s'étend de juin à septembre représentant 33% de l'année
- La saison creuse correspond au reste de l'année soit les mois de mai, octobre et novembre correspondant à 25% de l'année

D'une manière globale, la demande en eau de la saison touristique hivernale correspond à près de 60% de la demande en eau annuelle (figure F.16). C'est donc une période où la demande en ressources en eau est particulièrement forte. Cette demande se répartie pour 30% dans la demande en eau des enneigeurs et pour environ 50% dans la demande en eau de l'AEP touristique. Ainsi, environ 30% de la demande en eau hivernale est liée au développement du tourisme de sports d'hiver sur GemEve .

La saison de tourisme estivale, correspond à 30% de la demande en eau annuelle soit 2 fois moins que la saison hivernale. La répartition des demandes en eau par usage en été est logiquement très fortement dominée par l'AEP touristique (65%).

Enfin, la demande en eau pendant la basse saison, correspond à 13% de la demande en eau annuelle. Environ 30% de la consommation hors saison est due à la production de neige. Si ce

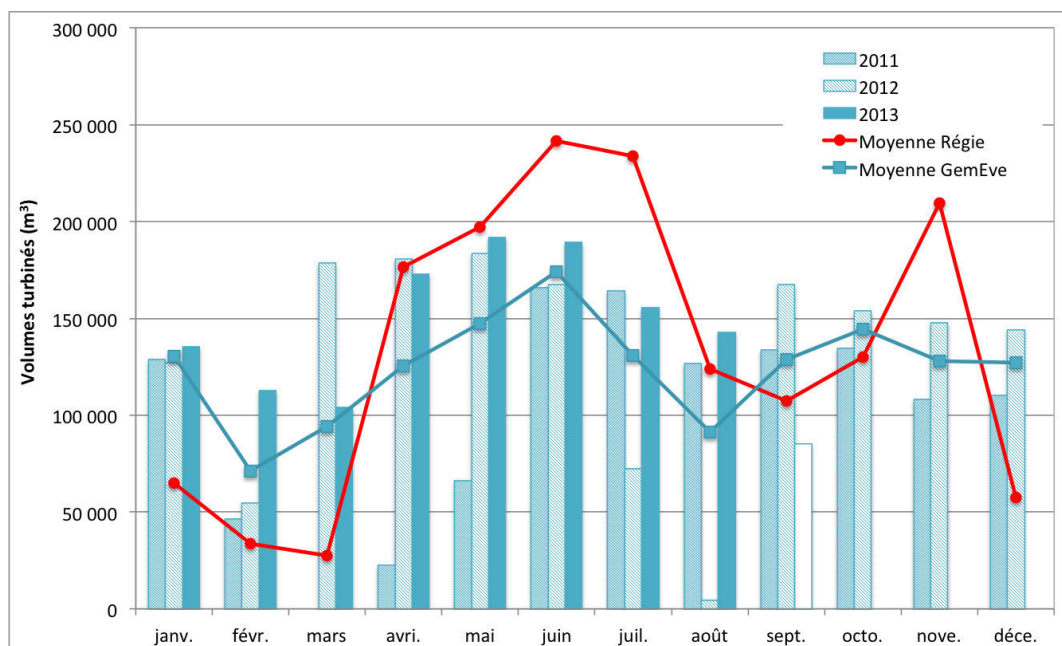


Figure F.15 – Consommations d’eau mensuelles moyennes (m³) d’hydroélectricité de GemEve comparées à la moyenne mensuelle des volumes turbinés par la régie des eaux (cf. F.9 page 103). Les mois d’octobre, novembre et décembre 2013 ne sont pas disponibles pour GemEve puisque les simulations s’arrêtent le 19/09/2013. Le mois de septembre étant aussi incomplet, ces mois ne sont pas comptabilisés dans la moyenne mensuelle (courbe bleue).

paramètre peut sembler peu opportun dans la demande en eau hors-saison il est en réalité dû à la constitution de la sous-couche de neige artificielle. En effet de mi-novembre à mi-décembre, les enneigeurs cherchent à produire dès que possible de la neige artificielle pour constituer la sous-couche (cf. section E - III - 4 page 83). Le mois de production de la sous-couche se situe hors-saison ce qui explique la répartition de la demande en eau particulière de la basse-saison. L’élevage reste ,même en dehors des saisons touristiques, un usage peu demandeur en eau (6% pendant la saison basse).

De manière générale pendant la période de simulation du 1 août 2009 au 19 septembre 2013, les demandes en eau des usages ont été satisfaites.

La figure F.17 fait néanmoins apparaître une période de tension où l’ensemble des demandes n’ont pas pu être satisfaites. Cette tension apparaît pendant une journée de mi-décembre de l’année 2010 pour la neige de culture. Cela signifie que pendant cette période, même si les conditions pour la production de neige artificielle étaient réunies et le besoin réel, la neige n’a pas pu être produite du fait d’un manque d’eau disponible. Si ce phénomène ne pose pas de question législative ni de problème particulier lorsqu’il ne se manifeste qu’une journée, il révèle la vulnérabilité de GemEve face aux disponibilités de la ressource. Néanmoins grâce aux règles de gestion et aux stratégies de priorité, les usages essentiels que sont l’AEP locale et touristique ne sont pas touchés par la pénurie. Néanmoins, en ces périodes de tensions, ni l’hydroélectricité, ni la neige artificielle ne peuvent fonctionner de façon optimale. Cette situation dans GemEve est due à un hiver particulièrement sec et donc avec un déficit en neige naturelle qu’il a fallu

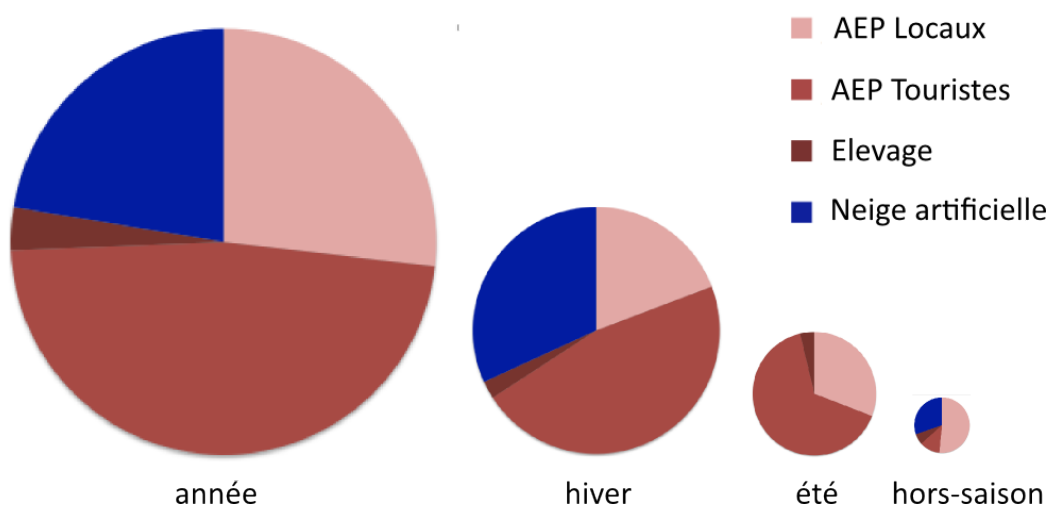


Figure F.16 – Évolution de la demande en eau par usage et par saison de GemEve (hors hydro-électricité)

compenser par la production de neige artificielle. Avec les évolutions climatiques et les potentiels besoins supplémentaires en neige artificielle, ce phénomène risque de s'aggraver et de poser de réels problèmes.

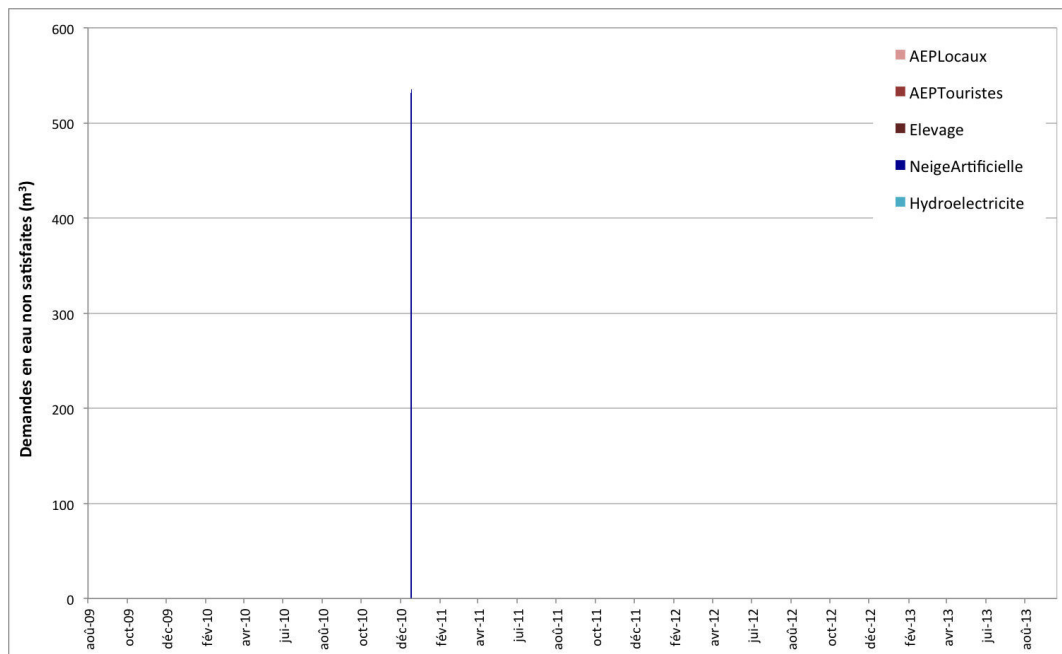
Dans les sections qui suivent, chaque usage est abordé indépendamment et comparé aux données de Megève disponibles (exception faite de l'hydroélectricité qui a été présentée précédemment).

#### F - III - 4 Les abonnés domestiques

Le terme abonnés domestiques utilisé par la régie des eaux fait référence à toutes les entités connectées au réseau d'eau potable de la municipalité. Dans GemEve les abonnés domestiques sont divisés en 3 catégories : l'alimentation en eau potable pour les locaux, l'alimentation en eau potable pour les touristes et l'élevage. Le choix d'intégrer l'élevage dans les abonnés domestiques est cohérent avec les observations faites par [SCERCL, 2009] sur le domaine de Megève où au moins 5 exploitations agricoles sont référencées dans les consommateurs d'eau potable.

De manière générale, la consommation d'AEP locale dans GemEve correspond à 35% de la consommation des abonnés, 61% pour l'AEP touristique et 4% pour l'élevage. Le nombre d'unités gros bétail et d'habitants de Megève étant fixe dans GemEve (supposant donc que l'ensemble de la population et des unités gros bétail sont présents toute l'année sur le territoire) la variation des consommations des abonnés domestiques est due uniquement à la variation du nombre de touristes.

Afin de comparer les résultats de GemEve par rapport à Megève, la chronique de débits délivrés par le réservoir la Livraz de Megève a été utilisée. Ainsi grâce aux données du RPQS et aux données de consommations hydroélectriques, le signal de l'hydroélectricité, des pertes du réseau et de la consommation des volumes techniques a été retiré des débits délivrés par la Livraz.

Figure F.17 – Demandes en eau non satisfaites (m<sup>3</sup>) dans GemEve

Puis le signal calculé de la consommation par les habitants et les unités gros bétail a également été soustrait en multipliant le nombre d'habitant par la consommation de ces derniers et le nombre d'unité gros bétail par leur consommation journalière. Ainsi une courbe estimée de la distribution d'eau pour l'AEP touristique de la Régie des Eaux a été réalisée à partir des données mesurées de distribution de la Livraz. Les résultats sont présentés dans la figure F.18.

On remarque que globalement les ordres de grandeurs et les saisonnalités entre GemEve et Megève sont respectés. Les pics de distributions de janvier et août sont bien marqués. Deux points de divergences apparaissent, en mars 2012, la Régie des eaux semble délivrer un débit aussi important qu'en janvier ce qui n'est pas le cas dans GemEve . Au vue de la configuration des vacances scolaires pendant l'année 2012 (cf. figure F.10), seulement 3 jours de mars ont été dans la période de vacances. Il ne semble donc pas évident de retrouver un pic de distribution aussi important que pendant les semaines de janvier ou février comprenant les vacances scolaires. De plus même en supposant que la clientèle étrangère ait comblé le déficit lié à l'absence de vacances scolaires françaises en mars, ce pic n'est pas présent en mars 2013. On peut donc raisonnablement supposer que l'estimation réalisée de la courbe de consommation de la régie pour mars 2012 présente une anomalie. De même, en décembre 2012 une consommation particulièrement basse est enregistrée ne correspondant probablement pas à la réalité de la consommation à cette période. Ces deux anomalies révèlent la difficulté d'estimer la valeur mensuelle liée au tourisme avec les données distribuées par les réservoirs de la Régie des eaux. En effet, un facteur de pertes d'environ 20% a été appliqué correspondant à la moyenne des pertes annuelles. Cependant ces dernières ne se répartissent peut-être pas uniformément dans l'année, de même que les prélèvements liés aux volumes techniques.

Néanmoins, malgré l'absence de données sur la fréquentation touristique et la reconstruction

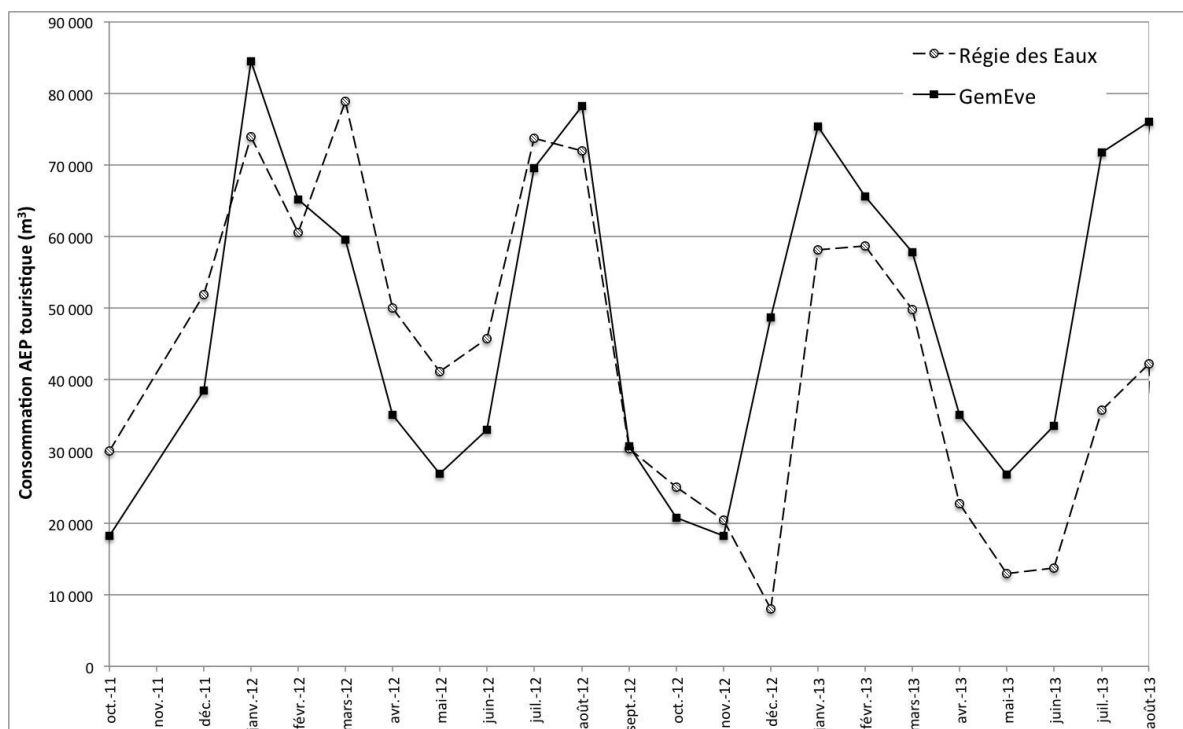


Figure F.18 – Consommation des touristes (m³) d'octobre 2011 à août 2013 estimée par GemEve et comparée à l'estimation des distributions de la régie des eaux pour l'AEP touristique

d'une chronique à partir d'éléments succincts, on peut constater que GemEve arrive à bien modéliser la saisonnalité et l'amplitude des consommations liées aux fluctuations touristiques. Ce résultat est particulièrement intéressant pour, par la suite, établir des scénarios de développement touristiques différents.

### F - III - 5 La production de neige artificielle

Les sorties du modèle hydrologique étant disponibles de septembre 2009 à août 2013, quatre hivers complets ont pu être simulés (figure F.19). Pour la comparaison avec les données de la Société des Remontées Mécaniques, seuls trois hivers sont disponibles (2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013). Néanmoins nous présentons les résultats de simulations des quatre hivers car ils permettent de constater qu'il y a trois configurations différentes pour la production de neige artificielle :

- les hivers pauvres en neige naturelle nécessitant une production de neige artificielle importante tout au long de la saison pour atteindre le minimum de skiabilité. Ce type d'hiver est représenté par l'hiver 2010/2011.
- les hivers riches en neige naturelle nécessitant de la neige artificielle uniquement pour la sous couche de début de saison. Les hivers 2011/2012 et 2012/2013 représentent cette catégorie.
- les hivers nécessitant de la neige artificielle pour la sous-couche et ponctuellement dans la saison pour entretenir le manteau neigeux comme pour l'hiver 2009/2010.

Dans l'application du modèle GemEve le seuil optimum de skiabilité a été fixé 55 cm et la sous-couche à 25 cm. Ces seuils ont été déterminés à partir des pratiques mentionnées lors d'un entretien avec les responsables de la société des remontées mécaniques de Megève. Ces derniers ont annoncé deux valeurs générales : un seuil minimal en dessous duquel il n'est pas possible de skier de 30 cm d'épaisseur de neige et un seuil optimum de skiabilité de 70 cm. Afin de simuler au mieux le fonctionnement réel de l'usage neige artificielle nous avons donc testé plusieurs valeurs de ces deux seuils, en prenant en compte un facteur de perte de 20% comme présenté dans la section E - III - 4 page 83. Les résultats de ces tests ont permis d'établir qu'un seuil de sous-couche à 25 cm et un seuil de skiabilité à 55 cm permettent à GemEve de représenter au mieux les pratiques de Megève pour la neige artificielle. Compte tenu de la méconnaissance de la part d'eau exacte évaporée en fonction de la température et de certaines pratiques anthropiques non communiquées et pouvant être propres à chaque station ces seuils semblent raisonnables. Les résultats montrent une erreur moyenne de -3% sur les années calendaires (avec une variation de l'erreur annuelle entre -21% et 30%) et de -8% si l'on considère les moyennes sur les trois hivers (avec une variation de l'erreur annuelle entre -17% et 17%).

On constate que les hivers où la neige naturelle est peu abondante, le recours à la neige artificielle permet d'ouvrir des pistes qui ne pourraient pas l'être autrement. Sur la figure F.19, l'hiver 2010/2011 atteint le minimum de skiabilité uniquement grâce à la production de neige. En revanche, lors d'années très neigeuses, le recours à la neige artificielle semble uniquement dû à la création de la sous-couche.

Les fenêtres de froids représentées permettent de visualiser les périodes où les conditions climatiques sont favorables à la production de neige artificielle. Cette donnée aura une importance majeure pour établir une gestion durable de l'eau dans les projections climatiques futures.

Pour vérifier la qualité du modèle pour la production de neige artificielle, les volumes d'eau consommés pour produire de la neige artificielle ont été comparés aux volumes d'eau mesurés mensuellement par la Société de Remontée Mécaniques de Megève pour les trois hivers de 2010 à 2013 (figure F.20). On constate que la simulation suit globalement la production observée. Une tendance à la surestimation des volumes produits en janvier et février pour l'hiver avec une faible quantité de neige naturelle est observable. Il peut donc exister une règle de gestion implicite qui consiste à ne pas maximiser le potentiel de neige artificielle pour ces hivers très consommateurs afin d'éviter les pénuries.

Pour les hivers riches en neige GemEve simule correctement les pics de production en décembre. On constate sur l'hiver 2011/2012 que le mois de décembre est l'unique mois de production. Cela est dû à l'absence de fenêtre de froid en novembre dans GemEve alors que la réalité semble avoir été différente. Ce résultat pointe l'amélioration possible de la simulation de la neige en utilisant un gradient de température distribuée. En effet dans GemEve seul la température moyenne du bassin versant est utilisée pour simuler la neige. Or l'automatisation des enneigeurs permet de déclencher certains secteurs indépendamment des autres. Il est donc probable que des secteurs en altitude puissent produire de la neige alors que ceux plus bas ne le peuvent pas.

On peut également s'interroger sur d'autres pratiques réelles grâce à la comparaison des deux résultats. En effet, pendant l'hiver 2011/2012 et 2012/2013, on constate qu'environ 20 000 m<sup>3</sup>

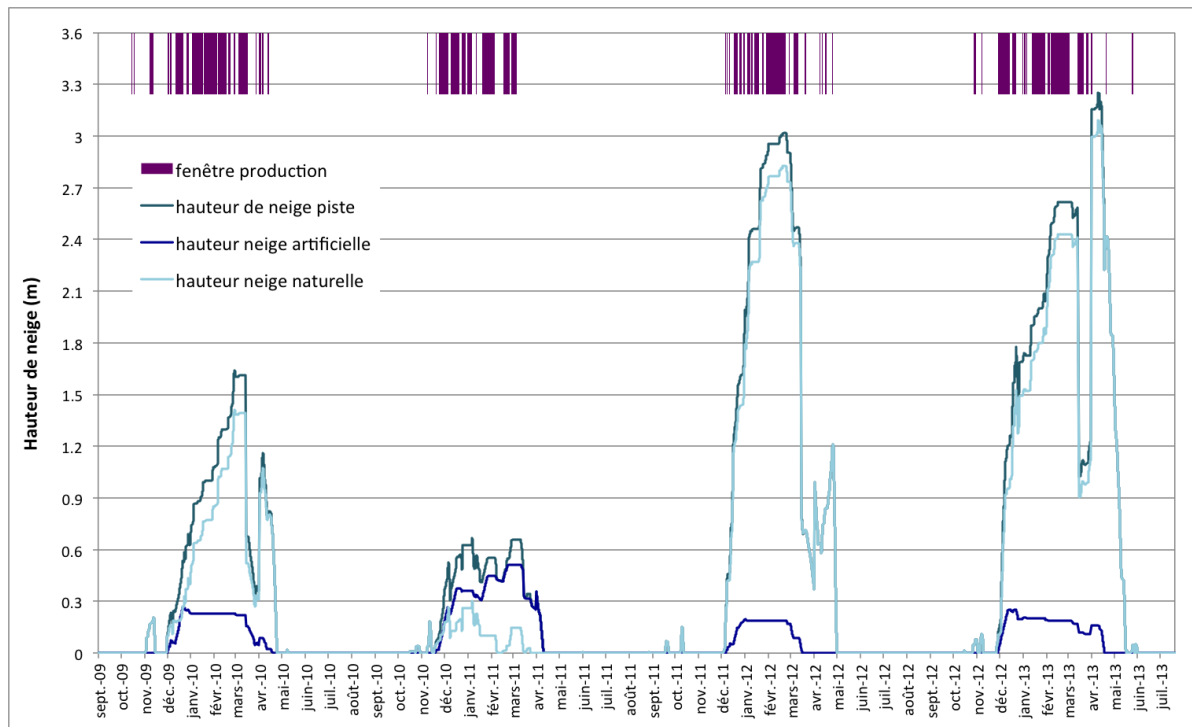


Figure F.19 – Hauteurs de neige simulées (m) pour GemEve de 2009 à 2013

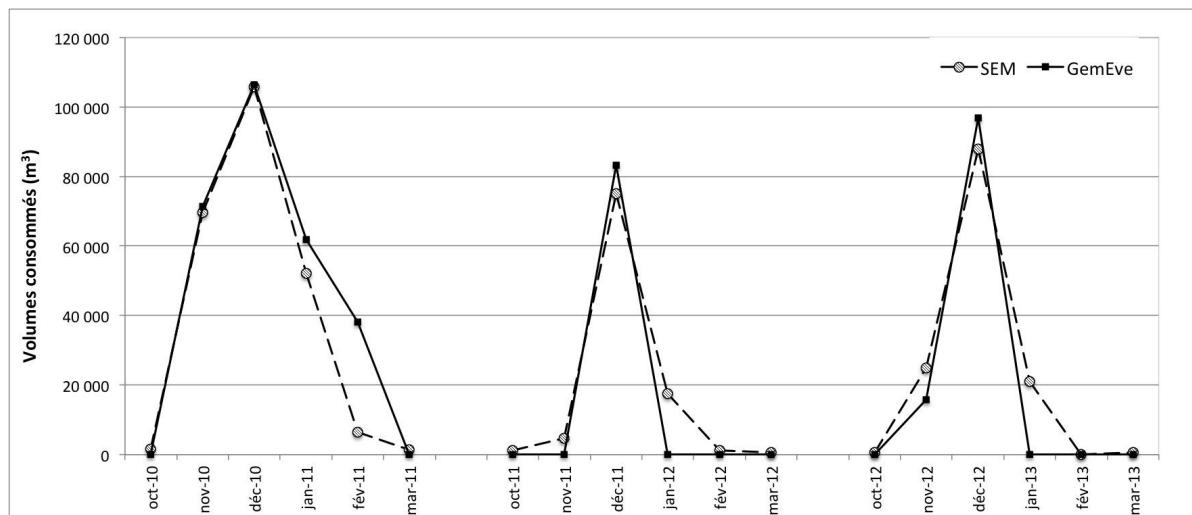


Figure F.20 – Volumes d'eau utilisés (m³) pour produire de la neige mesurés par la société de remontées mécaniques de Megève (SEM) et calculés par le modèle pour GemEve pour les hivers 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013



d'eau sont utilisés par la Société des Remontées Mécaniques en janvier pour produire de la neige alors que la hauteur de neige sur la piste excède 1 m. Ainsi le besoin en neige artificielle pendant ces mois n'est sûrement pas lié au manque de neige mais à une autre pratique non connue et donc non représentée dans le modèle. L'aménagement du front de neige, la gestion d'un snow park ou le stockage de neige en prévision d'éventuels redoux sont autant d'hypothèses intéressantes à interroger.

Néanmoins malgré cette différence, le  $R^2$  de ces trois années est de 0.93 avec une erreur totale faible indiquant la bonne capacité du modèle à représenter la consommation d'eau de la neige artificielle.

## F - IV Conclusion

L'analyse de la mise en œuvre de GemEve montre la bonne capacité du modèle à représenter les consommations des usages de l'eau. Malgré des données parfois parcellaires et des règles de gestion pas toujours connues dans leur intégralité, GemEve parvient à représenter très raisonnablement les consommations d'eau et leurs saisonnalités.

Les plus importantes différences proviennent de la consommation de la turbine hydroélectrique, ce qui s'explique par la méconnaissance de l'intégralité des règles de gestion de la turbine. Néanmoins cet usage de l'eau est de dernière priorité pour la commune et l'erreur moyenne reste faible dans GemEve par rapport à des règles de gestion différentes de Megève (-5%). Les deux autres usages particulièrement importants pour la commune que sont l'alimentation en eau potable pour l'activité touristique et la production de neige artificielle sont bien représentés et en quantité et en saisonnalité dans GemEve .

GemEve démontre ainsi sa capacité à bien représenter la gestion de l'eau d'une station touristique typique de moyenne montagne telle que Megève. On peut noter que des choix de répartition de captage différents sont opérés par rapport à la réalité montrant ainsi que plusieurs possibilités sont envisageables pour gérer l'eau.

L'intérêt particulier de GemEve est sa capacité à pouvoir prendre en compte des scénarios climatiques et des scénarios anthropiques et de modéliser leurs impacts sur l'apparition éventuelle de pénurie d'eau. Après avoir prouvé la capacité de GemEve à simuler l'état actuel d'une municipalité touristique des Alpes, une mise en perspective de l'intérêt de ce modèle est proposé dans le chapitre G.

---

### Discussion et perspectives

---

Dans le chapitre F, la mise en œuvre du modèle sur le terrain d'étude de Megève a prouvé son efficacité à simuler correctement le fonctionnement de la gestion de l'eau sur ce territoire. Cette démonstration ayant été présentée, nous discutons dans ce chapitre plus profondément la question de l'intérêt de développer un tel modèle.

Dans un premier temps, l'intérêt du développement du modèle dans la gestion de l'eau actuelle est présentée, puis dans un second temps, l'intérêt du modèle pour la prospective territoriale est développée.

#### G - I Intérêt du modèle sur le temps présent

Le modèle développé et présenté dans cette thèse utilise une structure assez complexe composée de différents modules, eux-même composés de plusieurs objets (au sens de la définition du chapitre E) interagissant entre eux. Cette structure, bien que très modulable, impose la conception d'un programme logiciel. Or, une partie des méthodes de calcul et des données utilisées pour faire fonctionner le modèle est très basique. C'est le cas pour trois usages que sont l'AEP locale, l'AEP touristique et l'élevage. En l'absence de données plus précises, ces usages sont calculés de manière triviale en multipliant une population, un nombre de touristes ou un nombre de bétail par une consommation horaire. Dans une station de ski typique de moyenne montagne, comme celle de Megève, ces trois usages représentent environ 80% de la consommation annuelle sans prendre en considération les pertes du réseau et en retirant l'hydroélectricité du total, (qui reste un usage optionnel non-vital pour la survie socio-économique de la commune). Dès lors, on peut s'interroger sur la nécessité de développer un logiciel pour répondre aux problématiques d'adaptation aux

changements climatiques dans le domaine de la gestion de l'eau.

Le modèle développé dans cette thèse présente un intérêt majeur par rapport à une utilisation triviale de données. Il permet de mettre en cohérence tous les éléments essentiels de la gestion de l'eau de manière dynamique. De la prise d'eau par les captages jusqu'à la satisfaction des demandes en eau des usages selon des règles et des stratégies établies, en passant par le réseau d'alimentation en eau et ses caractéristiques, c'est l'ensemble des composantes de la gestion de l'eau qui sont mises en interaction.

Connaissant toutes ces caractéristiques, l'optimisation de la gestion de l'eau peut être abordée par le modèle. Dans le cas de figure de l'application à Megève, on constate que le modèle GemEve répartit de manière différente la distribution d'eau que sur Megève (figure G.1), pourtant ce sont les caractéristiques des captages de Megève (débit min, débit max, débit moyen) qui ont été utilisées pour simuler GemEve . Ainsi avec les mêmes caractéristiques de départ, on s'aperçoit que deux méthodes de gestion, au minimum, sont possibles pour satisfaire les usages de façon équivalente.

Au vue de ce résultat, il est donc tout à fait possible de vouloir modifier les règles de gestion et d'en tester une combinaison infinie, dans des conditions réalistes, afin de dégager éventuellement les "meilleures" stratégies pour distribuer l'eau et satisfaire les usages. Le modèle peut donc être un réel outil d'optimisation de la gestion de l'eau actuelle.

L'autre utilité que peut avoir le modèle sur l'amélioration de la gestion de l'eau actuelle est sur la simulation de problèmes techniques et/ou de pollutions. Le modèle peut simuler la pollution d'un réservoir, ou la panne d'une pompe, etc. et analyser l'impact sur la satisfaction des usages et l'organisation de la distribution d'eau. Ainsi, il est possible d'évaluer l'efficacité des mesures de secours mises en places ou d'en développer de nouvelles permettant de faire face à plusieurs crises possibles. Dans le cadre de l'application GemEve , cette simulation de pannes a été réalisée (figure G.1) pour les captages de la Radaz et Plaine Joux. Le scénario envisagé pour la Radaz est une pollution qui contamine également Plaine Joux, un captage à l'aval, tandis que pour le Planay une panne de vanne, par exemple, est simulée. C'est-à-dire que ces captages ne sont plus utilisables pour l'alimentation en eau potable. Les résultats de ces simulations montrent qu'en cas de pollution de la Radaz et de Plaine Joux, le captage du Planay, de Cassioz et les forages de l'Altiport suffiraient à satisfaire les besoins en eau des usages.

Cependant dans la simulation de pannes du Planay, des pénuries d'eau apparaissent (figure G.2). Pendant la fin du mois de février et le début du mois d'avril, GemEve n'est pas en mesure de capter suffisamment d'eau au milieu naturel pour satisfaire ses besoins prioritaires. Ainsi, les touristes qui se trouveraient dans la station de GemEve un jour de panne du captage du Planay ne seraient pas en mesure de satisfaire l'intégralité de leurs besoins en eau.

Le modèle développé peut donc présenter un intérêt certain pour la recherche d'optimisation de gestion actuelle et pour l'évaluation de l'efficacité des mesures de secours en cas de pannes et ou pénuries. Au cours de cette thèse nous ne sommes pas allés plus loin dans l'exploration de cette thématique mais il semble intéressant de poursuivre le développement de l'outil pour y intégrer cette fonction d'optimisation.

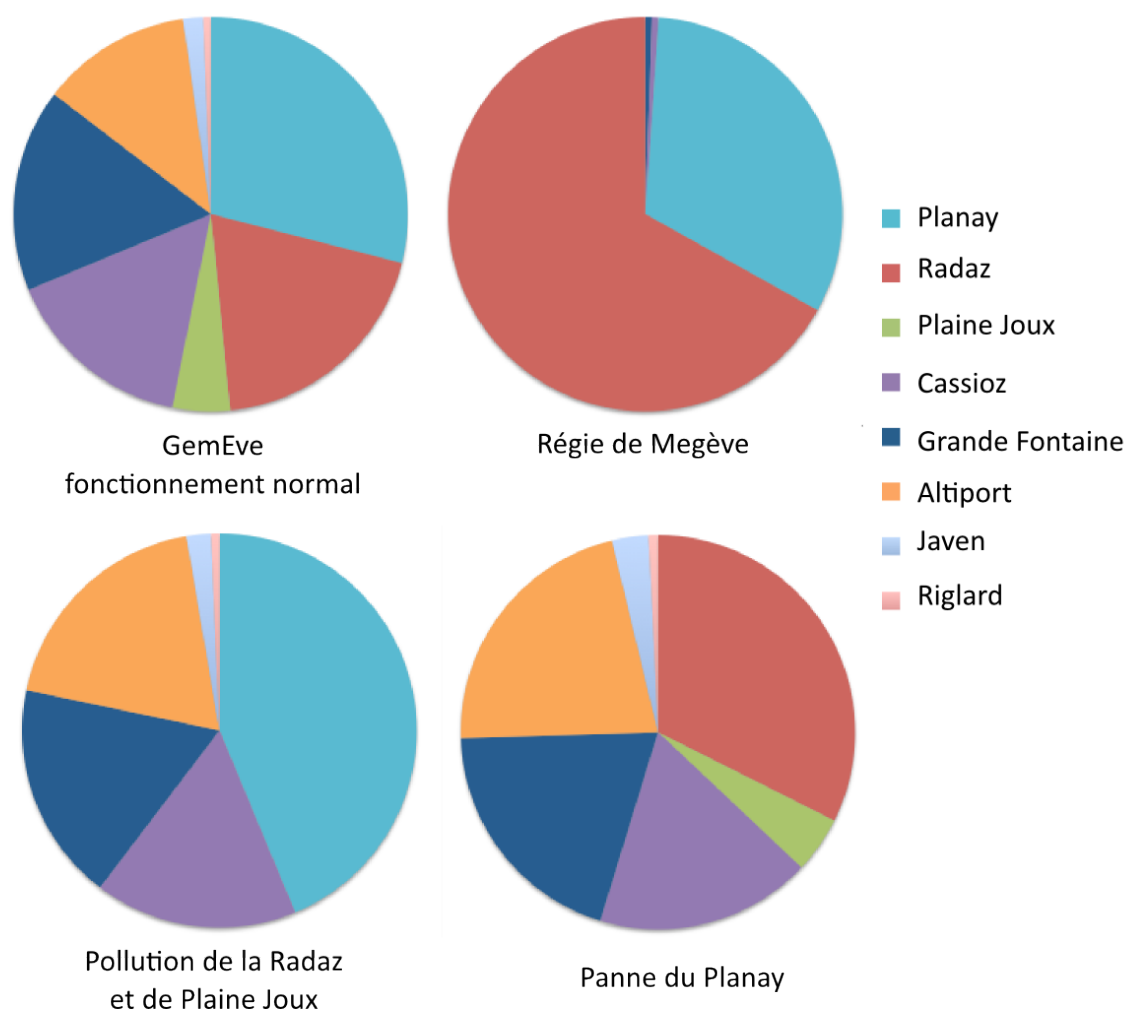


Figure G.1 – Résultats de la répartition de la distribution des captages suite à une simulation de pollution des captages de la Radaz et de Plaine Joux et une simulation de panne du Planay dans GemEve comparé au fonctionnement normal du modèle et de la Régie des Eaux de Megève

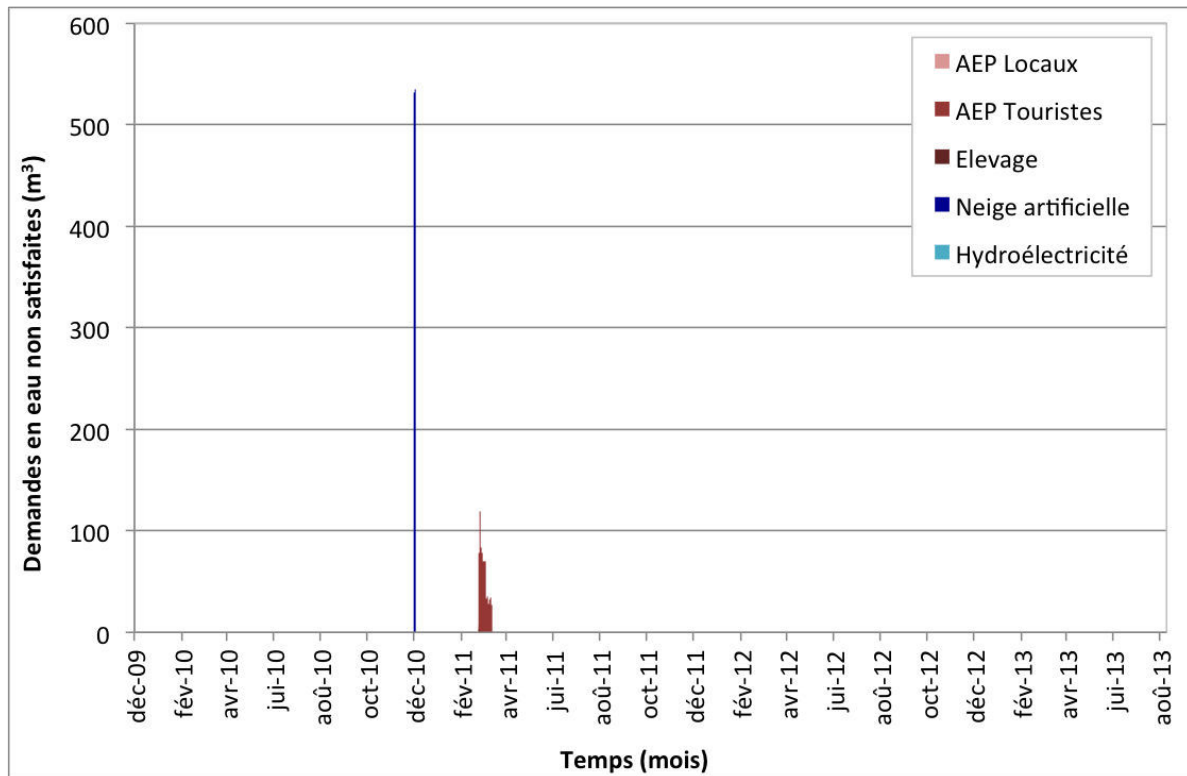


Figure G.2 – Apparition de pénuries en février et avril 2011 lors de la simulation de panne du captage du Planay dans GemEve

L'utilité majeure du développement du modèle est de pouvoir explorer les évolutions futures envisageables pour le territoire étudié. C'est ce qui est présenté dans la section suivante.

## G - II Intérêt du modèle pour le temps futur

Si le modèle possède un intérêt certain pour l'optimisation de la gestion de l'eau actuelle (*cf.* section précédente), qui est généralement déjà effectuée au quotidien par une régie des eaux ou une délégation de services publics compétente, sa principale utilité est dans l'exploration de scénarios socio-économiques et climatiques. En effet, la structure du modèle permet de tester des conditions climatiques différentes et des conditions socio-économiques différentes afin de voir leurs impacts respectifs sur les ressources en eau du territoire. La quantification de ces impacts étant par définition inaccessible à la mesure, le modèle présente un grand intérêt dans ce domaine. Pour cela on utilise des scénarios qui doivent permettre de répondre aux questions de prospective comme définies par [Loinger et Spohr \[2004\]](#) :

- Que peut-il advenir sur le territoire étudié du point de vue des ressources en eau ?
- Quelles solutions peuvent être mises en place pour faire au mieux dans ces nouvelles conditions ?

Pour aider à répondre à ces questions un panel de scénarios représentant des futurs possibles tant en terme de conditions climatiques que de conditions socio-économiques est transposé dans le modèle pour modifier son fonctionnement actuel.

## G - II - 1 Exploration des évolutions socio-économiques

L'exploration des impacts sur la ressource en eau de choix et d'évolution socio-économiques peut se faire dans le modèle à travers différents types de scénarios. Cela peut aller de véritables scénarios de prospective comme définis par [Loinger et Spohr, 2004] comme l'évolution des populations ou l'étalement du tourisme sur les quatre saisons à des scénarios plutôt de planification comme la construction d'une nouvelle retenue ou l'installation d'une nouvelle turbine.

Pour la planification territoriale, différentes évolutions peuvent être simulées dans le modèle. Les résultats doivent permettre de répondre aux problématiques de planification. Par exemple, l'équipement d'un nouveau versant en enneigeurs lié à un choix de développement de la station pourra nécessiter la construction d'une nouvelle retenue d'altitude. Grâce au modèle, il est possible de quantifier, compte-tenu des réglementations actuelles et futures, si les débits du milieu naturel seront suffisants pour remplir la retenue et ainsi de la dimensionner au mieux. Cette fonctionnalité peut être particulièrement utile lors de l'instruction de dossiers d'autorisation de prélèvement qui incorporent une vision à long terme des prélèvements. Cette démarche peut être généralisée pour tout nouveau projet impactant la gestion de l'eau sur le territoire.

Du point de vue des usages actuels de l'eau, le modèle prend en compte un (ou plusieurs) scénario propre aux évolutions possibles des usages dans la manière de calculer leur demande en eau. Ainsi, il est possible de faire évoluer la demande en eau de l'usage en fonction de ces scénarios. Par exemple pour le calcul de la demande en eau de l'AEP locale. Un scénario de croissance de la population basé sur les prédictions INSEE peut être introduit au début de la simulation. Ainsi tous les ans, le nombre d'habitants évoluera en fonction de ce taux de croissance et modifiera le calcul de la demande en eau de l'AEP locale.

Pour la prospective territoriale, les scénarios socio-économiques permettent d'explorer l'impact de choix de développement pour la municipalité. Par exemple, du fait du changement climatique, beaucoup d'institutions et de chercheurs préconisent le transfert d'un modèle touristique basé sur une très forte fréquentation hivernale vers une fréquentation mieux répartie sur les quatre saisons ou sur une fréquentation estivale qui deviendrait plus importante que la fréquentation hivernale avec comme point essentiel une diversification de l'offre touristique [région Rhône-Alpes, 2008], [Bourdeau, 2008], [Achin et George-Marcelpoil, 2013]. Estimer l'impact de cette modification de fréquentation touristique sur la ressource en eau est possible grâce au même modèle.

D'autres parts les impacts liés à des évolutions socio-économiques dues aux décisions politiques comme les engagements pris lors du Grenelle de l'environnement sont directement quantifiables dans les résultats du modèle. Ainsi, l'augmentation du débit réservé, la diminution des pertes du réseau d'alimentation en eau, la diminution de la consommation individuelle d'eau en lien avec l'amélioration des technologies (chasse d'eau deux vitesses, régulateur de débit, etc.) ou encore la réutilisation des eaux polluées ou des eaux de pluie sont autant de mesures dont les impacts peuvent être chiffrés concrètement par le modèle, sous réserve de données suffisantes.

Cette capacité représente un atout majeur dans la prospective territoriale. Elle permet de structurer un plan de développement de la municipalité autour d'ordres de grandeur concrets et à un pas de temps suffisant pour permettre une vision fine et globale de la gestion de l'eau.

Les choix socio-économiques envisagés pour la municipalité peuvent également être mis dans un contexte climatique différent afin d'observer s'ils sont toujours durables à différents horizons. C'est l'objectif du développement de scénarios climatiques.

## G - II - 2 Exploration des évolutions climatiques

Du point de vue climatique, les Alpes expérimentent un réchauffement rapide (*cf.* chapitre B) et une évolution des précipitations moins évidente à tracer. Ces changements climatiques ont des impacts certains sur la ressource en eau. Ainsi les modes de gestion et d'approvisionnement actuels sont susceptibles d'être fortement impactés par le changement climatique. Le modèle développé pendant cette thèse est capable de quantifier l'ampleur de ces modifications en fonction de l'intensité des changements constatés.

Pour ce faire, différents scénarios climatiques sont simulés dans le modèle. Ils servent de données d'entrées pour le module hydrologique qui en conséquence fait évoluer les débits naturels du territoire. Ainsi, les impacts des évolutions de l'hydrosystème du territoire du fait du changement climatique (période de fonte plus précoce, décalage des périodes d'étiage etc.) présentés dans le chapitre B sont quantifiables dans le modèle.

Dans une économie fortement orientée vers les sports d'hiver, les évolutions climatiques ont également un rôle majeur sur la production de neige et cela sur deux points. Premièrement les températures plus élevées engendrent un déficit en neige naturelle augmentant le recours à la neige artificielle pour compenser ce manque. Deuxièmement les températures plus élevées réduisent les périodes propices à la production de neige artificielle. Il faut donc produire plus en moins de temps.

Le modèle peut quantifier l'impact de l'évolution des températures sur la production de neige artificielle. Cela a été réalisé pour Megève et présenté dans la section G - II - 3 page 131.

De la même manière, si suffisamment de données sont disponibles, l'impact des changements climatiques sur la production d'hydroélectricité, sur la consommation d'eau potable, etc. sont quantifiables par le modèle.

La quantification des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d'un territoire permet une meilleure anticipation de ceux-ci. Grâce à des scénarios climatiques à différentes échelles temporelles (projection à 2050, projection à 2100), le gestionnaire de l'eau est en mesure de quantifier les évolutions auxquelles le territoire sera soumis. Ainsi, les choix de développement socio-économiques pourront être envisagés avec un esprit plus averti. Les aspects de rentabilité et de durabilité des investissements consentis dans un domaine seront mieux appréhendés au regard de la gestion des ressources en eau.

## G - II - 3 Exemple de scénarios appliqués à GemEve

## Conditions climatiques de 2050

La méthode pour définir les scénarios climatiques appliqués au modèle dans ce travail de thèse a été entièrement décrite par [Saulnier et al. \[2011b\]](#) dans le projet européen Alp-Water-Scarce. Nous en reprendrons ici les éléments principaux. Deux scénarios climatiques sont proposés pour GemEve pour la période 2050 :

- une augmentation des températures moyennes de +2.7°C et des précipitations similaires à celles de la période actuelle
- une augmentation des températures moyennes de +2.7°C et une augmentation des précipitations de +5% par rapport à la période actuelle

Ces scénarios découlent de plusieurs études. Tout d'abord le scénario A1B du GIEC a été utilisé pour projeter les évolutions de températures des réanalyses HistAlp [[Auer et al., 2007](#)]. Cela permet d'avoir une donnée plus centrée sur les Alpes de l'augmentation des températures futures qui s'élève à une augmentation de +2.7°C en 2050. Pour les précipitations, les prédictions sont bien plus incertaines (*cf.* chapitre B). Ainsi à partir des résultats du projet ENSEMBLE<sup>1</sup> définissant une légère augmentation des précipitations dans le nord des Alpes, deux scénarios sont proposés l'un avec des précipitations stables et l'autre avec une augmentation de +5% des précipitations par rapport à la période actuelle.

A partir de ces informations, la méthode des perturbations est appliquée aux données historiques du site pilote. Il s'agit d'ajouter un *décalage* sur chaque valeur journalière qui permet de générer une nouvelle série de températures et de précipitations. Ces nouvelles séries peuvent être considérées comme des séries de précipitations et de températures qui pourraient survenir dans un climat futur. Elles prennent en compte les données historiques du site pilote, ici Megève, les réanalyses HistAlp, les résultats du projet ENSEMBLE et les projections du scénario climatique A1B du GIEC.

Dans notre étude nous ne disposons que de quatre années consécutives, ce qui est très peu pour une analyse climatique. Néanmoins, ces données ont l'intérêt de présenter au moins trois profils d'hivers distincts : deux hivers très enneigés, un hiver moyennement enneigé et un hiver très peu enneigé. Ainsi, malgré la faible profondeur temporelle pour une analyse climatologique à proprement parlé, une certaine variabilité inter-annuelle est représentée dans cette série (figure G.3).

De même dans l'idéal, une continuité des scénarios climatiques entre la période actuelle et 2050 aurait pu apporter des éléments très intéressants sur les évolutions futures. Ne disposant pas de ces éléments pendant la réalisation de ce travail de thèse, nous présentons ci-après les résultats de l'application des scénarios climatiques en 2050, comme définis précédemment, dans le modèle GemEve .

La figure G.5 présente les résultats de consommations des usages de l'hydroélectricité et de la neige de culture dans les conditions climatiques de 2050, pour un scénario à précipitations

1. <http://www.ensembles-eu.org>



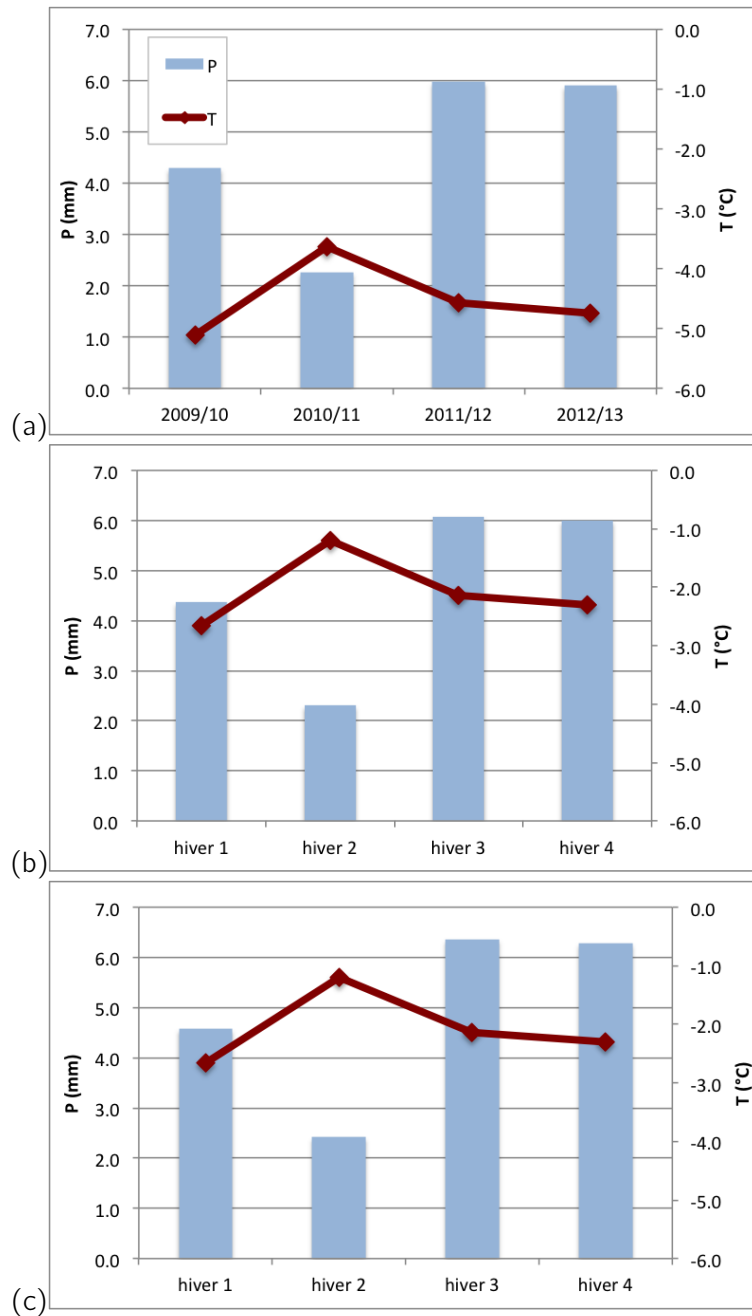


Figure G.3 – Évolution des précipitations et des températures sur quatre hivers (décembre, janvier, février) en 2050 selon un scénario d'augmentation des températures de +2.7°C et une stabilisation des précipitations (b) et selon un scénario d'augmentation des températures de +2.7°C et une augmentation des températures de +5% (c) par rapport au climat actuel (a)

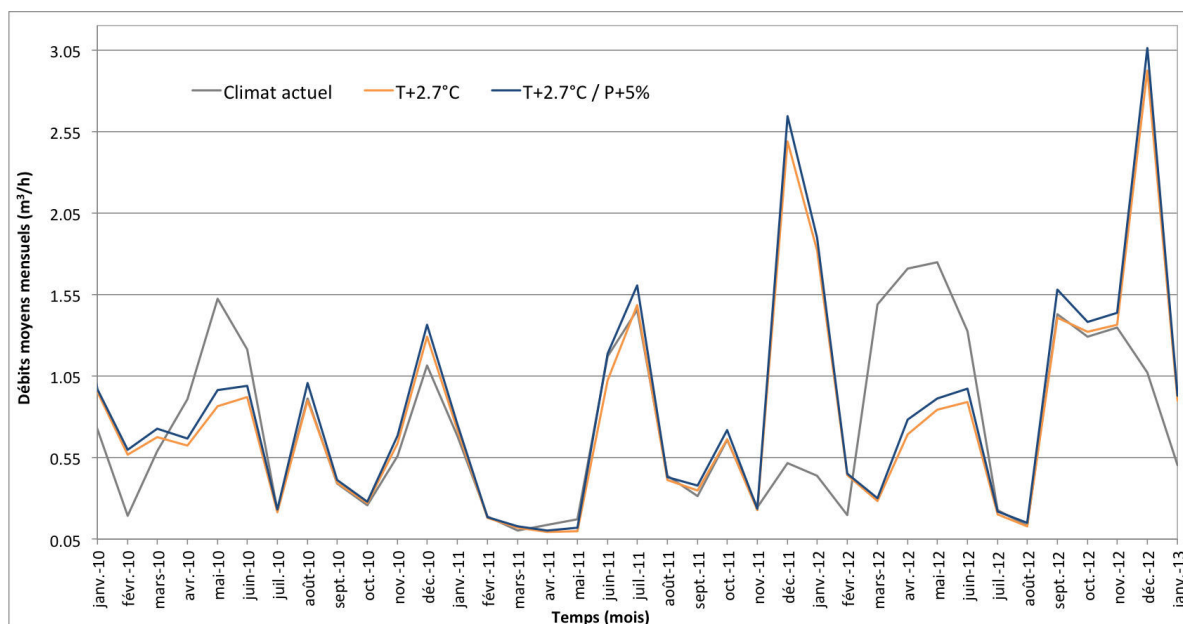


Figure G.4 – Débits moyen mensuels en m<sup>3</sup>/h pour les deux scénarios climatiques explorés pour la période 2050 comparés aux débits actuels

équivalentes à aujourd'hui et un scénario avec les précipitations augmentées de 5% par rapport à la période actuelle. Les activités anthropiques présentent les mêmes caractéristiques que celles développées dans GemEve et présentées dans le chapitre F. Ainsi les usages liés à l'alimentation en eau potable ne présentent pas d'évolution dans cette analyse car ils n'ont pas été soumis à des scénarios anthropiques (e.g. augmentation de la population touristique estivale).

Néanmoins, le premier résultat constaté est que l'ensemble des besoins essentiels que sont l'alimentation en eau potable des locaux, des touristes et des bovins est respecté. Les règles appliquées à GemEve permettent donc d'éviter les pénuries d'eau sur l'alimentation en eau potable, dans le contexte climatique de 2050, si le contexte socio-économique reste le même qu'actuellement. Sur les deux autres usages que sont l'hydroélectricité et la neige de culture, non prioritaires dans l'allocation d'eau, on observe des évolutions significatives.

La chronique de consommation de l'hydroélectricité évolue avec une production plus importante en décembre, janvier et février et une production plus faible de mars à juillet. Cela est certainement dû à l'augmentation des débits hivernaux comme observée sur la figure G.4 provoquée par une température plus chaude (figure G.3) favorisant les écoulements liquides. Plus d'eau est donc exploitable à cette période. Inversement, la période de fonte ayant eu lieu plus tôt dans la saison, cette eau n'est plus disponible de mars à juillet, et n'est donc pas turbinée.

Le choix d'un scénario avec des précipitations équivalentes à celles observées actuellement ou d'un scénario avec des précipitations augmentées de 5% a une importance dans l'amplitude de l'évolution de la chronique de production hydroélectrique. Ainsi dans un scénario plus pluvieux, plus d'eau est turbinée dans l'année par rapport à la situation actuelle même si la différence est faible (+1%) alors que dans un scénario sec, la tendance est à une production hydroélectrique de -2% par rapport à la situation actuelle. Ainsi, si la saisonnalité de production hydroélectrique

varie avec les évolutions climatiques, l'impact quantitatif annuel est moindre, l'augmentation de la consommation hydroélectrique des mois d'hiver compensant la diminution de ceux du printemps. Cette évolution pourrait même être perçue comme un avantage puisque la demande électrique est plus forte en hiver qu'en été. L'hydroélectricité serait donc en mesure d'apporter une réponse intéressante à ce besoin énergétique dans les conditions climatiques de 2050.

Pour la neige artificielle, les évolutions de consommations d'eau sont importantes. Les mois de janvier, février et mars voient leur consommations en eau pour la neige artificielle augmentée fortement avec plus de 5 fois la consommation actuelle pour le mois de janvier. En revanche, les mois de novembre et décembre observent une diminution de la quantité d'eau consommée par la neige de culture. Cette diminution est due à l'augmentation des températures hivernales empêchant la production de neige.

L'évolution des précipitations vers un climat plus humide (précipitations +5%) ne semble pas avoir un impact majeur sur l'évolution de la consommation d'eau de la neige artificielle de 2050. Seuls les mois de février et mars nécessitent moins d'eau dans un scénario plus humide (environ 4000 m<sup>3</sup> de différence par mois soit 3% du total consommé avec un scénario sans évolutions de précipitations) du fait de plus de précipitations neigeuses. La température semble donc être le facteur le plus décisif dans l'évolution de la consommation en eau par l'usage neige artificielle.

Ainsi, la figure [G.6](#) présente les hauteurs de neige dans le cas d'un scénario climatique où les températures seraient plus élevées de 2.7°C et les précipitations équivalentes aux valeurs actuelles. Par comparaison, les hauteurs de neige simulées par GemEve dans les conditions actuelles sont en moyenne de 60 cm (entre novembre et avril) alors que celles de 2050 sont de 12 cm en moyenne. Le nombre de fenêtres de froids diminuent également drastiquement. Actuellement le nombre de fenêtres de production est de 3564 heures soit environ 148 jours contre 2047 heures en 2050 soit environ 85 jours. Ces fenêtres de production sont déterminées par les contraintes techniques des enneigeurs, c'est à dire une température inférieure à -2°C pendant les heures de production (entre 18h et 4h du matin). La diminution de ces fenêtres de froid, la diminution de la quantité de neige naturelle et l'augmentation de la fonte hivernale sont trois conséquences de l'augmentation des températures hivernales qui ont un impact majeur sur l'activité touristique hivernale. En effet, le seuil minimal de skiabilité pour ouvrir un domaine skiable est de 30 cm de hauteur de neige (selon un entretien de juin 2014 avec le gestionnaire de la Société des Remontées Mécaniques de Megève) . Avec la capacité actuelle des enneigeurs artificiels définis dans GemEve , c'est à dire un débit maximum de projection de 720 m<sup>3</sup> d'eau par heure (correspondant à la pratique de Megève), il n'est pas possible de compenser la perte de neige naturelle par de la neige artificielle pour atteindre les 30 cm de hauteur de neige sur la piste. Ainsi La pratique du ski est possible en moyenne pendant 47 jours, à infrastructures égales dans GemEve en 2050, contre 137 jours en moyenne pendant les quatre hivers de 2009 à 2012.

Cette activité économique étant primordiale pour les stations touristiques de montagne, une analyse plus approfondie des solutions envisageables pour pallier au manque de neige artificielle est proposée page [131](#).

De même, après avoir observé l'impact des scénarios climatiques sur les activités anthropiques actuelles, une exploration de l'impact de certains choix socio-économiques est effectué ci-après.

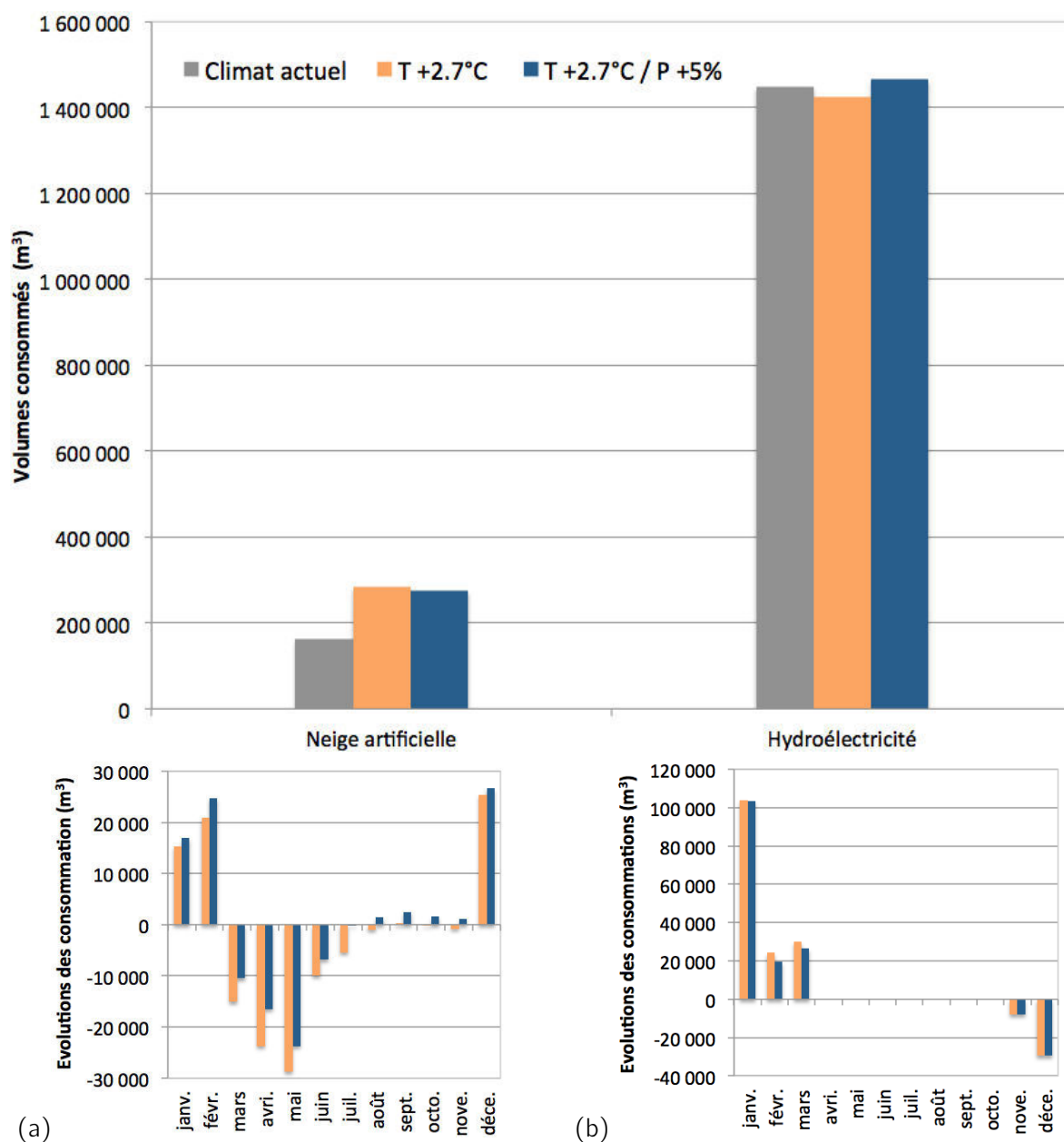


Figure G.5 – Évolution des consommations des usages hydroélectricité et neige de culture en 2050 sous deux scénarios climatiques : températures moyennes +2.7°C, précipitations similaires (en orange), températures moyennes +2.7°C et précipitations +5% (en bleu). Différences mensuelles pour l'usage hydroélectricité (a) et l'usage neige de culture (b)

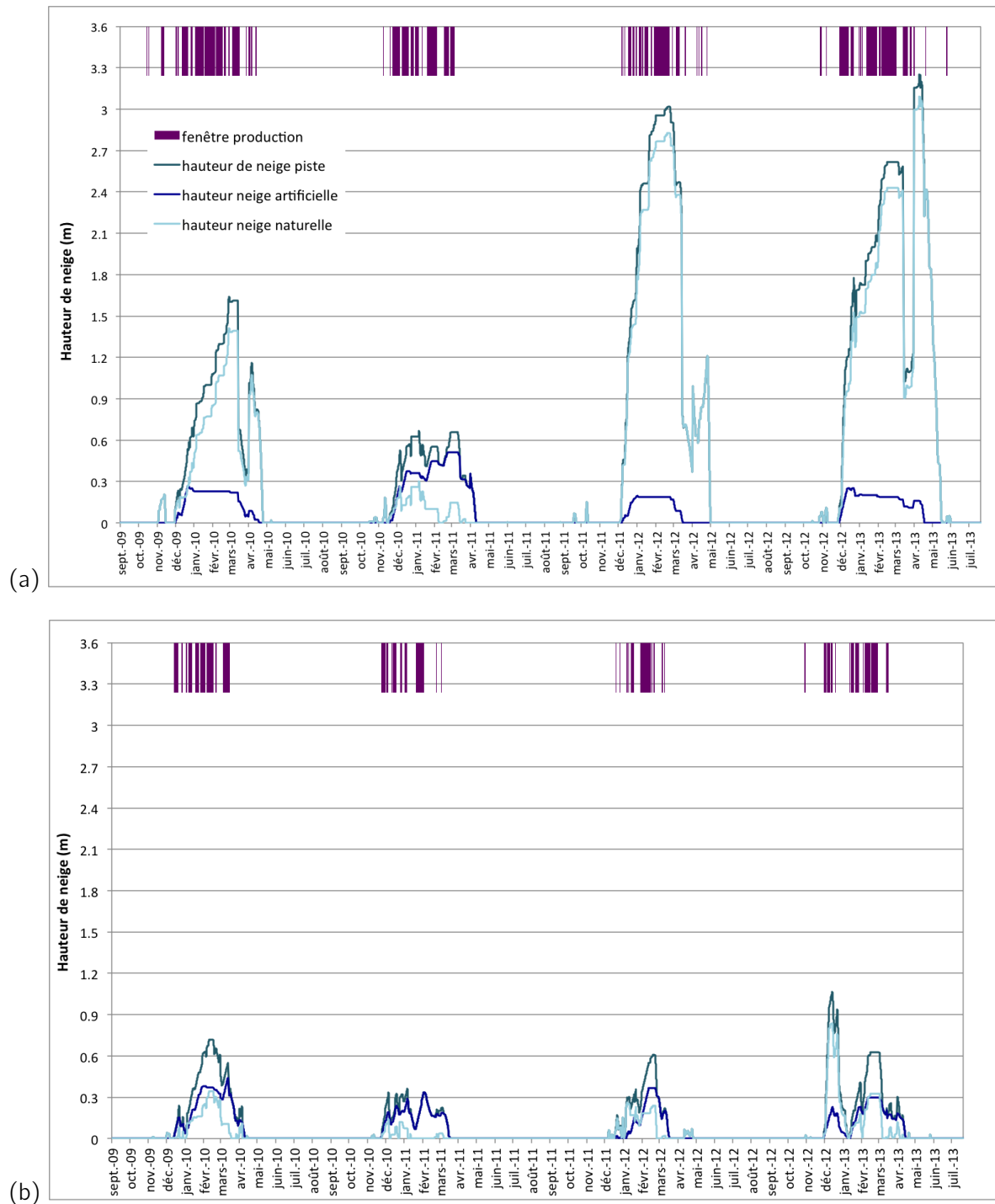


Figure G.6 – Hauteurs de neige (m) et fenêtres de froids dans les conditions climatiques actuelles (a) et dans les conditions climatiques de 2050 supposant une augmentation des températures de +2.7°C et des précipitations équivalentes au climat actuel (b)

## Pratiques de neige artificielle

Déjà actuellement, la neige de culture peut servir lors d'hivers particulièrement pauvres en neige naturelle à compenser cette dernière afin de pouvoir ouvrir les pistes. Cela a notamment été le cas pendant l'hiver 2010/2011 (*cf.* figure G.6 (a)).

Ce cas présent sera incontournable pour le climat de 2050. Sans neige de culture, l'ouverture des pistes ne pourra se faire que moins de 50 jours par an. Or, il est souvent annoncé qu'une station de sports d'hiver devient rentable à partir du seuil de 100 jours d'ouverture par an [Paccard, 2010]. La production de neige artificielle devient donc impérative dans les conditions climatiques de 2050 pour le maintien de l'ouverture de la station de ski.

Plusieurs simulations ont donc été effectuées dans GemEve afin d'observer à quelles conditions, la viabilité du maintien de l'activité ski pourrait s'effectuer. La figure G.7 présente l'évolution du nombre de jours d'ouverture moyen sur les quatre hivers simulés dans le climat de 2050, en fonction de la puissance maximum des enneigeurs utilisée (exprimée en  $\text{m}^3/\text{h}$ ) avec un réservoir d'eau dédié à la neige de culture de la taille de la retenue de Javen ( $65\,000\,\text{m}^3$ ) auquel a été ajouté le volume stockée de la nouvelle retenue colinaire mise en service en 2014 au Mont d'Arbois d'une contenance de  $60\,000\,\text{m}^3$ . Ainsi ce sont  $125\,000\,\text{m}^3$  de stockage d'eau dédié à la neige de culture qui sont utilisés pour simuler la puissance nécessaire en enneigeurs qu'il faudrait pour atteindre au moins 100 jours d'ouverture par an dans les conditions de 2050 (températures  $+2.7^\circ\text{C}$ , précipitations stables). Dans ce scénario anthropique où la réserve d'eau dédiée à la neige de culture est équivalente à la situation actuelle, il faudrait multiplié la capacité des enneigeurs par plus de 7.5 pour permettre une ouverture de piste 100 jours par an. Plus de  $400\,000\,\text{m}^3$  d'eau serait alors dédiée à la neige de culture (contre  $160\,000\,\text{m}^3$  actuellement), sans remettre cependant en question les débits minimaux pour le milieu naturel ou l'alimentation en eau potable.

Si l'on souhaite s'affranchir de la limitation liée à la réserve d'eau dédiée à la neige de culture pour savoir quelle serait les possibilités de production, les simulations ont été réalisées avec une réserve infinie (figure G.8). Ainsi on observe que dans les conditions actuelles de production (*i.e.* température déclenchante à  $-2^\circ\text{C}$  et une production nocturne entre 18h et 4h du matin), un débit de  $42\,200\,\text{m}^3/\text{h}$  serait nécessaire pour obtenir 100 jours d'enneigement à plus de 30 cm. Pour atteindre cette production une réserve dédiée à la neige de culture de  $200\,000\,\text{m}^3$  serait nécessaire, soit la nécessité de construire une nouvelle réserve de  $75\,000\,\text{m}^3$ .

Pour continuer dans les scénarios possibles pour la neige de culture, une évolution de la plage horaire de production a été imaginée. Ainsi comme pour les grandes stations de ski travaillant avec deux équipes de dameurs, comme l'Alpe d'Huez, il est possible d'imaginer une production de neige artificielle toute la nuit, retravaillée ensuite par les dameurs jusqu'à l'ouverture des pistes (figure G.9). Ce scénario a été envisagé dans deux cas de figure : le déclenchement des enneigeurs à une température de  $-2^\circ\text{C}$  et un scénario où l'évolution des technologies liées aux enneigeurs permettraient de produire de la neige à partir de  $-1^\circ\text{C}$ .

Dans le premier cas, on observe que la station serait viable à partir d'un débit de production de  $3200\,\text{m}^3/\text{h}$  des enneigeurs soit plus de 4 fois le débit actuel. Dans un scénario d'amélioration de la technicité des enneigeurs, la viabilité de la station de GemEve serait assurée à partir d'un

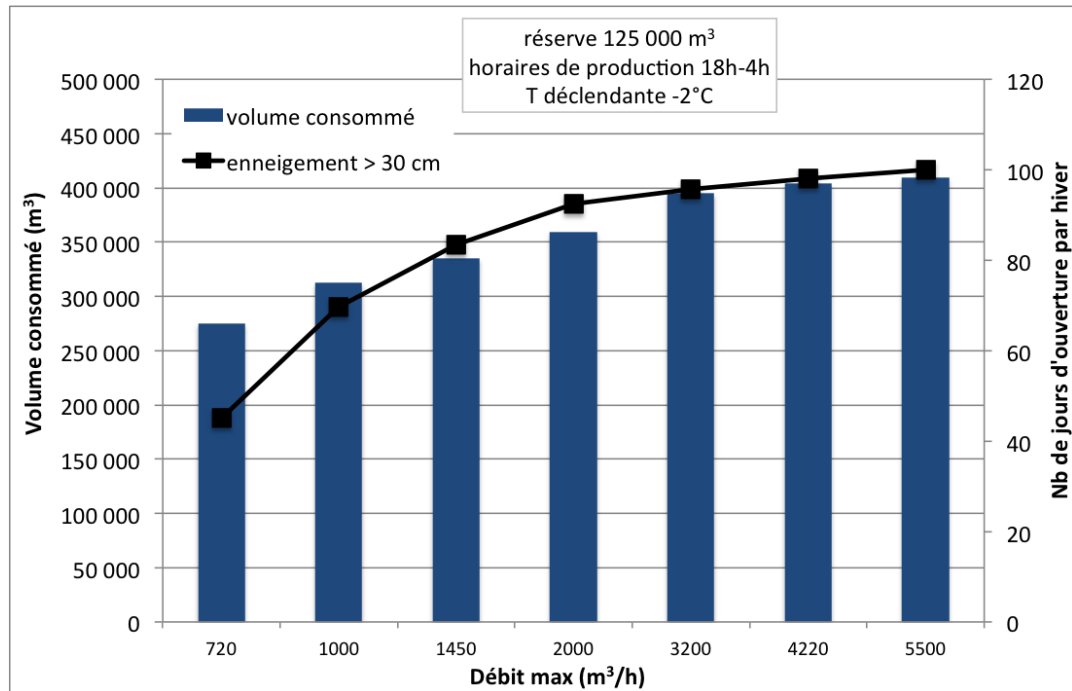


Figure G.7 – Évolution du nombre de jours d'ouverture de piste (enneigement > 30 cm) et du volume d'eau consommé par les enneigeurs (m³) en fonction du débit maximum des enneigeurs (m³/h) dans les conditions climatiques de 2050 (températures +2.7°C, précipitations stables).

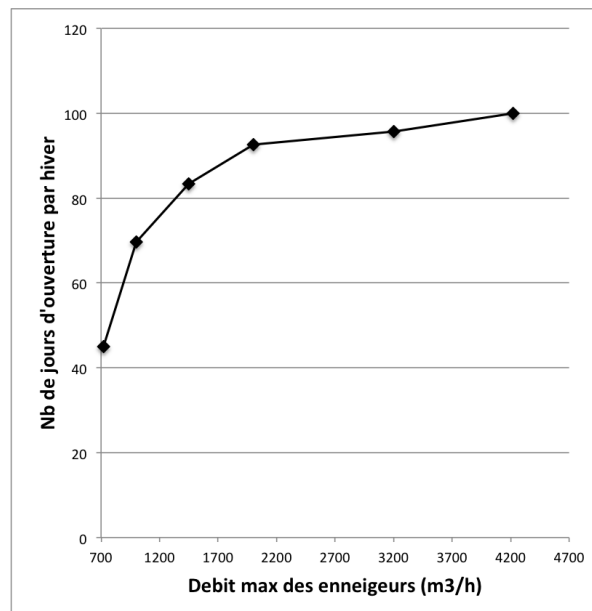


Figure G.8 – Évolution du nombre de jours d'ouverture de piste (enneigement > 30 cm) en fonction du débit maximum des enneigeurs (m³/h) dans les conditions climatiques de 2050 (températures +2.7°C, précipitations stables), sans limitation de stock d'eau disponible.

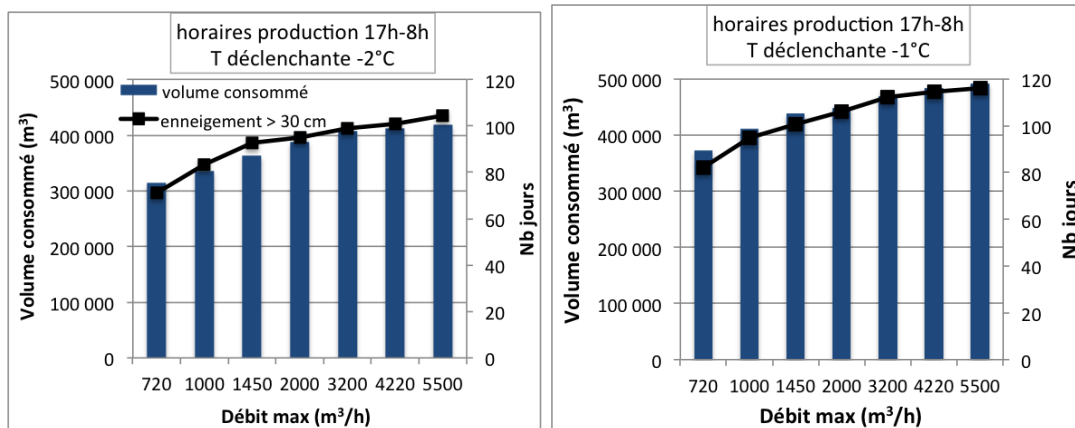


Figure G.9 – Évolution du nombre de jours d'ouverture de piste (enneigement > 30 cm) et du volume d'eau consommé par les enneigeurs (m³) en fonction du débit maximum des enneigeurs (m³/h) dans les conditions climatiques de 2050 (températures +2.7°C, précipitations stables) avec une production de neige artificielle de 17h à 8h du matin et une température de déclenchement des canons à neige de -2°C (à gauche) et de -1°C (à droite).

débit de 1450 m³/h des enneigeurs, soit deux fois la capacité actuelle.

Ces scénarios permettent d'explorer les possibilités de maintien de l'activité ski dans un contexte d'augmentation des températures. Si la date d'apparition de ces prédictions peut être sujette à débat et interrogations, il est néanmoins certain que ces températures se produiront dans les 50 prochaines années. Le modèle développé est donc très intéressant pour explorer les possibilités qui s'ouvrent aux décideurs et estimer l'impact de leurs choix.

Le modèle peut également permettre de chiffrer les coûts économiques du maintien de la pratique des sports d'hiver du point de vue des ressources en eau. Ainsi, en connaissant les coûts d'investissements et de fonctionnement des nouvelles infrastructures à installer pour maintenir le niveau de skiabilité (comme des enneigeurs, des retenues d'altitude, etc.), l'évaluation des coûts de l'adaptation de cet usage aux nouveaux éléments climatiques est réalisable. Des questions de rentabilité des stations de sports d'hiver, au regard de la nécessité de développement d'infrastructures supplémentaires, peuvent donc être interrogées. Cette question ne doit pas néanmoins masquer le fait que même si l'adaptation des stations de ski dans le climat futur est techniquement envisageable, elle permettra de maintenir un ruban neigeux sur une largeur de piste encadrée par des canons à neige dans un paysage peu voire pas enneigé. L'image de carte postale actuelle sera alors largement modifiée pendant une partie de l'hiver.

Ainsi, s'il est toujours possible d'envisager des solutions techniques, la question du modèle économique centré sur la pratique de sports d'hiver se pose de manière prégnante. Le modèle présente l'intérêt de pouvoir tester des scénarios d'évolution touristiques différents pour GemEve



## Pratiques touristiques

Dans un climat futur plus chaud et plus caniculaire en été [EEA, 2007], il est probable que les stations touristiques d'altitude deviennent des destinations de vacances privilégiées pour une certaine catégorie de personnes (personnes âgées, asthmatiques, etc.) cherchant à se prémunir des effets des vagues de chaleur. GemEve pourrait alors exploiter cette caractéristique pour développer un tourisme estival vantant les bien faits du *fresh air* et proposant des soins de balnéothérapie et autre tourisme de bien-être.

En effectuant des simulations avec GemEve des évolutions touristiques estivales, le potentiel de développement d'un tourisme de bien-être estival semble tout à fait possible. Même avec une augmentation de 50% de la population touristique de GemEve en été, suffisamment d'eau est présente dans le milieu dans le scénario 2050 pour satisfaire les besoins de ces nouveaux touristes.

Dans un autre scénario touristique, prenant en compte l'arrêt de l'exploitation de la station de sport d'hiver pour se consacrer uniquement à la saison estivale, avec une augmentation de 50% de la population touristique en été (figure G.10), les réserves dédiées à la neige de culture seraient réaffectées à la production d'hydroélectricité. Ainsi le potentiel de turbinage augmenterait d'environ 1 750 000 m<sup>3</sup> par an en moyenne. En estimant un coût de rachat du kWh à 0,0607 € [Tenevia, 2014], le gain engendré serait de près de 90 000 € par an. Ainsi l'augmentation des débits hivernaux due à des températures hivernales plus chaudes, peut avoir un intérêt économique puisque l'eau n'est pas consommée par les touristes absents en hiver. Cette évolution aura néanmoins du mal à compenser la manne économique liée à l'activité touristique hivernale. Cependant, le développement du tourisme estival de bien-être pourrait également permettre de compenser la perte liée au manque de neige.

## Combinaison de scénarios

L'intérêt de GemEve réside dans la modularité et souplesse des choix effectués. Aussi, les scénarios présentés précédemment ont été imaginés car semblant se rapprocher des problématiques actuelles de stations touristiques de moyenne montagne mais une infinité de scénario et de combinaison de scénarios sont envisageables.

Pour en faire ici la démonstration, il est imaginé une fermeture de l'exploitation du domaine skiable en hiver et une augmentation du tourisme estival de 50%, couplé avec une pollution du captage du Planay. Les résultats de cette simulation dans GemEve montre l'apparition d'une pénurie d'eau les 3 et 8 août sur l'alimentation en eau potable touristique. Cela montre qu'un soin particulier devra être porter aux procédures de secours en cas de pollution de captage si un développement touristique plus conséquent est prévu en été.

Ce scénario tout à fait théorique montre l'intérêt de GemEve dans le domaine de la prospective territoriale. L'utilisation de cet outil par ou en collaboration avec les décideurs politiques pourrait permettre un développement de stratégies d'adaptation au changement climatique au regard de l'évolution des ressources en eau pertinent et efficace. C'est ce qui est évoqué dans la section suivante.

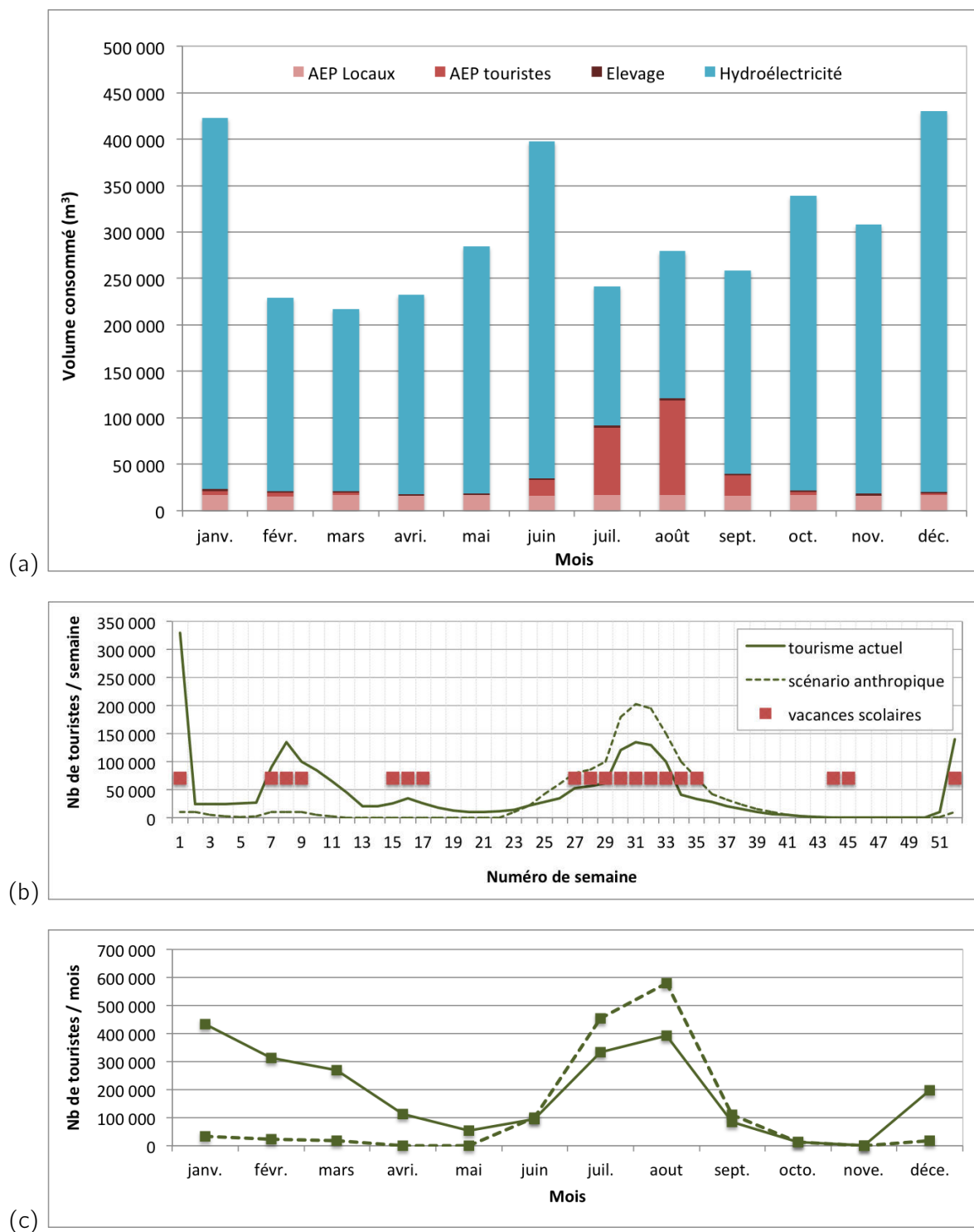


Figure G.10 – Évolution des consommations des usages (a) dans un scénario anthropique sans exploitation de la station de ski hivernale, avec une augmentation de la population touristique estivale de 50% (b) et (c)

## G - III Perspectives

Au vue des capacités de GemEve à simuler le comportement actuel de la gestion de l'eau (chapitre F) et les évolutions futures des ressources en eau ainsi que l'impact des choix socio-économiques, ce modèle se montre un outil particulièrement intéressant pour l'adaptation aux changements climatiques. En effet, comme observé au chapitre D les pénuries d'eau ont deux facteurs d'apparition : une ressource naturelle insuffisante et une exploitation de la ressource trop importante. Ainsi, GemEve en représentant à la fois le milieu naturel et l'environnement anthropique permet d'explorer l'impact du changement climatique et des choix socio-économique sur ces deux pendants de l'apparition des pénuries d'eau. C'est donc un outil utile pour dresser et tester différentes stratégies au changement climatique et en quantifier les impacts et les enjeux.

Pour aller plus loin dans la définition de ces stratégies, et l'utilisation du modèle sur d'autres terrains d'étude, des perspectives d'évolution pour GemEve sont proposées. Ainsi, le développement de modules plus sophistiqués, notamment pour la prise en compte de l'augmentation des consommations d'eau par personne en été lors de températures chaudes ou le développement d'un module agricole sur la consommation en eau des cultures serait intéressant à envisager. Le premier pour estimer si cet impact est important dans le paysage global des consommations en eau, le deuxième pour pouvoir appliquer et développer le modèle sur un bassin versant comprenant des cultures agricoles. Le développement d'un objet station d'épuration plus conséquent pourrait aussi apporter des données intéressantes à exploiter, notamment en terme de capacité de dépollution d'eau et le cas échéant de réutilisation des eaux nettoyées dans certains usages. La récupération des eaux de pluie pourrait également être intéressante à tester dans la recherche de stratégie d'adaptation au changement climatique.

L'amélioration du modèle hydrologique avec un couplage dynamique est également une piste d'amélioration intéressante à étudier. En effet, le modèle est conçu pour être couplé avec un modèle hydrologique distribué, fournissant en chaque point du bassin versant un débit naturel, et dialoguant avec le modèle anthropique. Faute de disponibilité des sorties d'un tel modèle, GemEve n'a pas pu être tester dans cette configuration dynamique. Il serait donc intéressant de tester ce processus et d'en analyser les améliorations ou non.

Nous avons également déjà notifié l'intérêt de développer le modèle dans un mode *optimisation* qui permettrait d'analyser sous un angle différent les règles d'allocation d'eau dans GemEve et peut-être d'en trouver des plus efficaces. Cette optimisation permettrait également de tester les différentes règles, notamment de protection incendie ou de dérivation en cas de pollution des des captages, et le cas échéant d'en élaborer de plus efficaces.

Enfin dans une optique d'amélioration des évolutions climatiques et de leurs impacts, le développement de scénarios climatiques continus de la période actuelle jusqu'en 2050 serait un précieux avantage. Cela permettrait de voir à partir de quel moment le modèle actuel deviendrait non viable et ainsi de mettre en place des analyses de rentabilité sur les gros investissements effectués de nos jours pour le maintien de l'activité touristique hivernale ainsi que d'identifier à partir de quand le développement de l'adaptation au changement climatique ne sera plus une option mais une réalité de tous les jours.

Outre les améliorations techniques envisageables pour le modèle, une autre perspective s'ouvre à partir de l'exploitation de ce dernier. En effet, l'ouverture de la Science vers la Société pour une meilleure compréhension de l'impact des changements climatiques sur la gestion de l'eau par l'ensemble des personnes y aillant un intérêt, c'est à dire tout le monde, nous semble un défi inévitable à relever pour une mise en place effective et efficace de stratégies d'adaptation. Le développement de GemEve en Serious-Game semble une possibilité très intéressante à explorer pour relever ce défi. Cette perspective est développée plus longuement dans la [Troisième partie](#).



Troisième partie

## **Interface Science-Société**



---

### Diffusion des savoirs, la clé de l'adaptation au changement climatique

---

La diffusion sociale des connaissances scientifiques et techniques est une question récurrente depuis des décennies. L'objectif de la diffusion des savoirs est, dans un sens très large, d'accroître la compréhension publique de la science [[Labasse, 1999](#)]. Il convient néanmoins de s'interroger sur l'objectif réel sous-jacent à cette volonté de diffusion. Les motivations du développement de la culture scientifique peuvent être de plusieurs ordres et ont fait l'objet de différents classements. En synthétisant les classifications de [Schiele et al. \[1994\]](#), [Durant et al. \[1989\]](#), [Thomas et Durant \[1987\]](#), on peut déterminer qu'il existe quatre enjeux principaux à la communication scientifique :

- un enjeu de responsabilité démocratique, c'est à dire permettre aux citoyens de comprendre et participer aux décisions politiques prises en se basant sur des informations scientifiques au sens large
- un enjeu économique, c'est à dire de développement de la capacité de concurrence économique en formant des consommateurs mieux instruits et mieux disposés à l'égard des produits technologiques mais également en accroissant la qualification de la main-d'œuvre et ainsi la compétitivité d'une nation
- un enjeu socio-éducatif en permettant à chacun de prolonger son apprentissage tout au long de sa vie évitant ainsi que l'évolution technologique ne laisse en arrière une partie de la société
- un enjeu humaniste en permettant des choix collectifs et individuels éclairés et rationnels et de lutter contre l'irrationnel et les pseudos-sciences.

La question de la diffusion des connaissances scientifiques est donc une nécessité pour répondre à ces enjeux majeurs de nos sociétés. Néanmoins cette diffusion reste problématique et difficile.



C'est pourquoi la communication scientifique est un domaine étudié de longue date et le rapport de [Labasse \[1999\]](#) pour la Cours Européenne fait bien état des questionnements relatifs à cette question dans sa globalité.

Dans cette partie, loin de chercher à apporter une réponse sur la question globale de la diffusion des connaissances scientifiques, nous nous intéresserons à la manière de diffuser les résultats présentés dans cette thèse et plus particulièrement au chapitre [F](#) et au chapitre [G](#), notamment en développant des outils de communication pour simplifier l'appropriation du savoir dans le domaine spécifique de l'adaptation au changement climatique.

## H - I La communication sur le changement climatique : un défi difficile à relever

### H - I - 1 Les difficultés de communiquer la problématique du changement climatique liées à la nature du phénomène

Depuis le début des années 1990, le changement climatique est devenu une préoccupation des scientifiques et des politiques (*cf.* chapitre [C](#)). Face à une nouvelle menace pour le bien-être des populations, la communauté scientifique a communiqué les enjeux liés à ce phénomène depuis plus de trente ans sans parvenir à faire du changement climatique un sujet prioritaire pour les populations et les politiques [[Moser, 2010](#)], [[Moser et Dilling, 2004](#)].

Même si le climato-scepticisme a reculé ces dernières années (en 2015 80% des français pensent que le changement climatique est "dû en grande partie à l'activité humaine" [[Le Hir, 2015](#)] et 74% des Etats-Uniens en 1997 [[Immerwahr, 1999](#)], les actions prises par chacun tardent à se faire tangibles. L'étude de [O'Neill et Nicholson-Cole \[2009\]](#) montre que si le changement climatique est maintenant perçu par la population comme étant un sujet important, il n'est pas considéré comme *personnellement* important par les personnes interrogées. Ce paradoxe vient du caractère particulier du changement climatique et de sa difficile communication. Quelques aspects de cette spécificité sont détaillées ci-dessous.

La première difficulté à communiquer le changement climatique tient du fait qu'il s'agit d'un phénomène agissant sur des temps longs avec des conséquences qui ne sont pas expérimentées dans la vie quotidienne des personnes [[Moser, 2010](#)], [[Moser et Dilling, 2004](#)]. Le réchauffement climatique par exemple est un processus long où les changements ne se visualisent pas clairement jour après jour (figure [H.1](#)). L'homme moderne évoluant principalement dans un milieu fortement anthropisé remarque d'autant moins ces petits changements quotidiens qu'il n'est plus en connection directe avec la nature [[Moser, 2010](#)].

Dans l'étude de [O'Neill et Nicholson-Cole \[2009\]](#), la plupart des participants notent que si le changement climatique venait à avoir des effets négatifs plus locaux et personnels, ils deviendraient bien plus concernés par le phénomène. Il y a donc une distance temporelle et géographique importante quand à la perception du risque lié au changement climatique. De la distance temporelle découle un manque d'engagement personnel pour résoudre un problème jugé comme lointain. Plusieurs études (*e.g.* [Tonn et al. \[2006\]](#), [Lorenzoni et al. \[2007\]](#)) montrent la difficulté de l'être

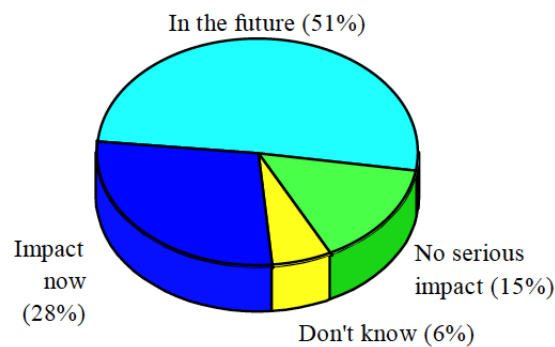


Figure H.1 – Réponse à la question "pensez-vous que le réchauffement climatique soit un problème environnemental qui a un sérieux impact actuellement ou pensez-vous que l'impact du réchauffement climatique n'arrivera pas avant un certain temps dans l'avenir, ou pensez-vous que le réchauffement climatique n'aura pas d'impacts sérieux du tout ? *Source* : CBS New York Times nov/1997, in [[Immerwahr, 1999](#)]

humain à se projeter dans le futur. La limitation dans le temps de notre faculté de projection varie entre un horizon à 15-20 ans et 50 ans selon les études. Les scénarios de développement climatiques imaginés aux horizons 2050 paraissent déjà comme trop lointains et donc trop hypothétiques pour la plupart des individus [[Lorenzoni et al., 2007](#)]. A cette difficile imagination du futur s'ajoute l'absence de gratification à prendre des actions positives pour l'atténuation au changement climatique. Le décalage entre le système climatique et les systèmes sociaux font qu'il est difficile voire impossible pour un individu de voir les effets positifs de son action sur la diminution des gaz à effets de serre au cours de sa vie. Cette absence de gratification est un facteur limitant pour l'engagement personnel [[Moser, 2010](#)].

Enfin à la distance temporelle s'ajoute souvent la distance géographique. La plupart des images utilisées pour communiquer sur le changement climatique sont éloignées géographiquement des pays les plus émetteurs de gaz à effet de serre. On peut notamment citer la fonte de la calotte polaire et du Groenland avec la désormais traditionnelle image de l'ours polaire sur un morceau de banquise dérivant comme l'une de ces images fortes véhiculant l'idée du changement climatique. [O'Neill et Nicholson-Cole \[2009\]](#) note que les images employées sont parfois si éloignées de l'expérience des participants qu'elles sont facilement oubliées même si leur impact initial a pu être important.

Compte-tenu qu'une personne a une capacité d'inquiétude limitée (le concept de *finite pool of worry* développé par [Linville et Fischer \[1991\]](#) définit qu'une attention croissante portée sur un risque donné décroît l'attention pour d'autres risques car l'individu ne possède qu'une certaine quantité d'inquiétude possible), les distances temporelles et géographiques des impacts du changement climatique font que ce problème est relayé comme non prioritaire par rapport aux problèmes jugés plus immédiats tels que les besoins vitaux, l'emploi, l'économie, la sécurité, etc. Le changement climatique n'est donc pas une préoccupation majeure des populations.

La deuxième difficulté à affronter lorsque l'on souhaite communiquer sur le changement climatique est la complexité des processus et leur diversité. Les connaissances scientifiques progressent grandement dans ce domaine chaque année mais un grand nombre d'incertitudes reste encore à

lever. Ainsi si les certitudes quant à certains phénomènes comme l'augmentation des températures dues à l'augmentation des gaz à effet de serre liée à l'activité humaine, sont désormais irréfutables, il n'en est pas de même sur de nombreux autres points comme le rôle des tâches solaires, le relargage de CO<sub>2</sub> liée à la fonte du permafrost, etc. Cette complexité bien que passionnante pour les scientifiques est perçue comme inintéressante et nébuleuse par la population. Néanmoins, le cerveau humain cherche toujours à apporter des éléments de réponse à un problème. Ainsi, en tentant de comprendre un phénomène complexe, le cerveau construit une réponse à partir de référentiels pré-existants, ce qui dans le cas du changement climatique peut aboutir à des relations grandement erronées entre les causes, les conséquences et les solutions possibles [Moser et Dilling, 2004]. La confusion avec d'autres problèmes environnementaux est aussi de mise. Dans son étude [Immerwahr, 1999], montre qu'un tiers des répondants identifient les centrales nucléaires comme sources du changement climatique.

De la complexité naît aussi l'incertitude. Les scientifiques par rigueur communiquent toujours dans les résultats de leurs études les incertitudes auxquelles ils sont confrontés. Cette discussion prend une part importante dans la communication du changement climatique. Elle a été utilisée de nombreuses fois comme argument pour reporter les actions à prendre pour lutter contre le changement climatique, encourageant un comportement attentiste [Moser, 2010]. La communication au public d'un problème complexe, invisible, entaché d'incertitudes est un véritable challenge comparée aux préoccupations beaucoup plus immédiates de la population.

## H - I - 2 Les pièges à éviter

Tout d'abord en suivant les préconisations de l'introduction de ce chapitre, on peut s'interroger sur la nécessité de communiquer sur le changement climatique. Quel est le but poursuivi en communiquant sur les phénomènes que regroupe le terme *changement climatique* ?

Selon la classification présentée p.141, la communication du changement climatique doit en premier lieu servir l'enjeu de responsabilité démocratique et cela dans un double sens. Tout d'abord la communication du changement climatique doit permettre au citoyen de saisir la nécessité du développement de politiques d'atténuation et d'adaptation. En permettant au citoyen de comprendre l'importance des enjeux et de faire siennes les problématiques du changement climatique, les politiques volontaristes seront plus soutenues et peut-être même appelées par la société. La communication doit donc servir à développer l'adhésion suffisante de la société pour le développement de mesures et politiques adéquates et efficaces. En prenant le problème dans le sens inverse, la communication sur les mesures d'adaptation et d'atténuation développées par les gouvernements, nécessitant des efforts personnels par chaque citoyens doit permettre de faire percevoir ces efforts comme nécessaires et utiles afin qu'ils soient acceptés par chacun. Un bon exemple dans ce domaine est celui du recyclage des déchets. En donnant des consignes claires perçues par la population comme pouvant faire la différence et résoudre un problème jugé sérieux, le recyclage des déchets est devenue une habitude de chacun [Immerwahr, 1999]. C'est le but à atteindre dans la communication des politiques d'adaptation et d'atténuation au changement climatique.

Fort de cette volonté, il existe une littérature de plus en plus abondante sur les pièges à éviter

et les pistes à explorer. Nous évoquerons ici les deux principaux pièges dans lesquels il ne faut pas tomber afin de promouvoir l'engagement et les actions concrètes des politiques et des citoyens.

La première erreur souvent commise par les scientifiques qui souhaitent communiquer sur leur axe de recherche pour encourager des actions concrètes est d'assumer que le manque d'informations et de connaissances explique le manque de préoccupation et d'engagement du public sur le sujet étudié. Cette hypothèse connue sous le terme de *knowledge deficit model* [Sturgis et Allum, 2004] suppose qu'en fournissant plus d'informations et d'explications et en développant donc les connaissances du public celui-ci s'engagera en conséquence.

Cependant, les recherches effectuées dans le domaine de la communication de problème scientifiques à la société ont montré à plusieurs reprises que la connaissance seule ne suffit pas pour motiver et engager la population [Wolf et Moser, 2011]. Une connaissance plus approfondie d'un problème n'implique pas nécessairement et directement un changement de comportement.

Cette hypothèse peut même être contre-productive. Au-delà du risque que l'individu perçoive le scientifique comme condescendant, Immerwahr [1999] montre que l'augmentation d'informations sur le changement climatique et la gravité de ses impacts a pour effet principal d'augmenter la frustration du public et non pas de l'engager durablement. L'absence de réponses faisant sens pour l'individu pour faire face aux impacts du changement climatique fait que toute communication sur le sujet augmente le sentiment que ce problème est insolvable à son échelle. La frustration engendre un désintéressement de ce problème. Ainsi en augmentant la quantité d'informations ou de connaissances sur le changement climatique, le communicant ne conduit pas forcément à une adhésion plus forte aux problématiques exposées.

A l'heure actuelle, la grande majorité des citoyens reconnaissent que le changement climatique est un risque pour notre société. Leur inaction n'est donc pas liée au scepticisme par rapport à l'existence du problème mais par rapport à notre capacité à le résoudre Immerwahr [1999]. Si l'objectif est d'engager les citoyens, il est donc plus important de promouvoir une communication ciblée sur les solutions, les efforts qu'elles nécessiteront et les bénéfices qui en résulteront que sur un accroissement de la quantité de connaissances scientifiques de chaque individu.

Le deuxième piège dans lequel les communicants sur le changement climatique tombent fréquemment est la sur-utilisation d'images alarmistes et catastrophiques pour illustrer le problème. L'hypothèse sous-jacente est qu'en utilisant des images alarmistes, l'individu va se saisir des enjeux afin d'éviter les conséquences tragiques de son inaction. Malheureusement, les études montrent que généralement le public rejette les campagnes utilisant la peur ou la culpabilité comme moteur d'engagement [O'Neill et Nicholson-Cole, 2009].

L'utilisation massive de la peur comme communication des impacts du changement climatique sans présentation de moyens effectifs de contrer les conséquences catastrophiques annoncées peuvent engendrer un déni, une frustration et un désintéressement du sujet [Moser et Dilling, 2011] en lien avec la *finite pool of worry* expliquée précédemment. Les participants à l'étude de [O'Neill et Nicholson-Cole, 2009] ont insisté sur le fait que des images montrant les impacts locaux du changement climatique sont nécessaires pour communiquer la pertinence locale des impacts des changements climatiques mais également que des images d'actions concrètes sont nécessaires pour que chacun se sente capable d'intervenir. Braman et Kahan [2008] suggèrent

que les communications qui affirment plutôt que menacent représentent un meilleur potentiel de réception d'une information à propos d'un risque. Ces campagnes de communications doivent toujours être accompagnées d'éléments d'information sur des actions concrètes pouvant contribuer à des solutions faisables afin d'être efficaces.

La diffusion des savoirs scientifiques est une question délicate. La nature même du changement climatique rend encore plus délicate cette diffusion pourtant nécessaire pour une réponse efficace aux enjeux devant nous. Les trente années de communication sur le sujet qui se sont écoulées ont permis d'identifier des méthodes contre-productives et de dégager des pistes d'action pour un avenir plus constructif. Dans la suite de ce chapitre nous présenterons les résultats de la contribution du projet C3-Alps à la diffusion des connaissances sur le changement climatique. Puis le chapitre I reviendra sur une initiative originale : le développement d'outils ludiques pour la gestion de l'eau.

## H - II Les résultats de C3-Alps

Le projet C3-Alps (*Capitalisation of Climate Change knowledge in the Alps*) présenté brièvement dans le chapitre C a pour but principal de faciliter le transfert des connaissances générées lors de précédents projets de l'Espace Alpin afin de conduire des actions pour l'adaptation au changement climatique au niveau local et régional.

La naissance du programme C3-Alps vient donc du constat que les projets européens conçus pour explorer différentes dynamiques en cours sur le territoire ne parviennent pas facilement à un transfert des connaissances générées et à une application concrète des avancées découvertes pendant les projets. Il y a donc un décalage entre la production de connaissances et son application sur le terrain pourtant souhaitée par l'Europe. Fort de cette constatation le projet C3-Alps a été conçu pour capitaliser les connaissances générées de précédents projets afin de conduire des actions d'adaptation ciblées au niveau local et régional.

### H - II - 1 Simplification de l'accès à l'information par des outils de synthèse

La première contribution de C3-Alps pour faciliter la mise en oeuvre de l'adaptation au changement climatique d'un point de vue politique et juridique a été de réaliser des synthèses facilement accessibles aux décideurs politiques et aux citoyens intéressés par le sujet.

Dans cet objectif, une plateforme internet regroupant l'ensemble des connaissances générées pendant les projets de l'Espace Alpin ainsi que toutes les informations utiles pour la mise en oeuvre de l'adaptation du changement climatique au niveau local a été créée. Le but est de faciliter l'accès à une littérature déjà existante, utile et nécessaire pour les décideurs politiques (figure H.2). Dans une enquête réalisée pendant le projet C3-Alps seuls 20% des répondants trouvent que l'accès à une information jugée de qualité à propos de l'adaptation au changement climatique est aisée. Cela révèle que la documentation facile d'accès est rarement satisfaisante pour ceux qui la lisent. La plateforme créée permet de trier par domaine de connaissances (scénarios futurs,

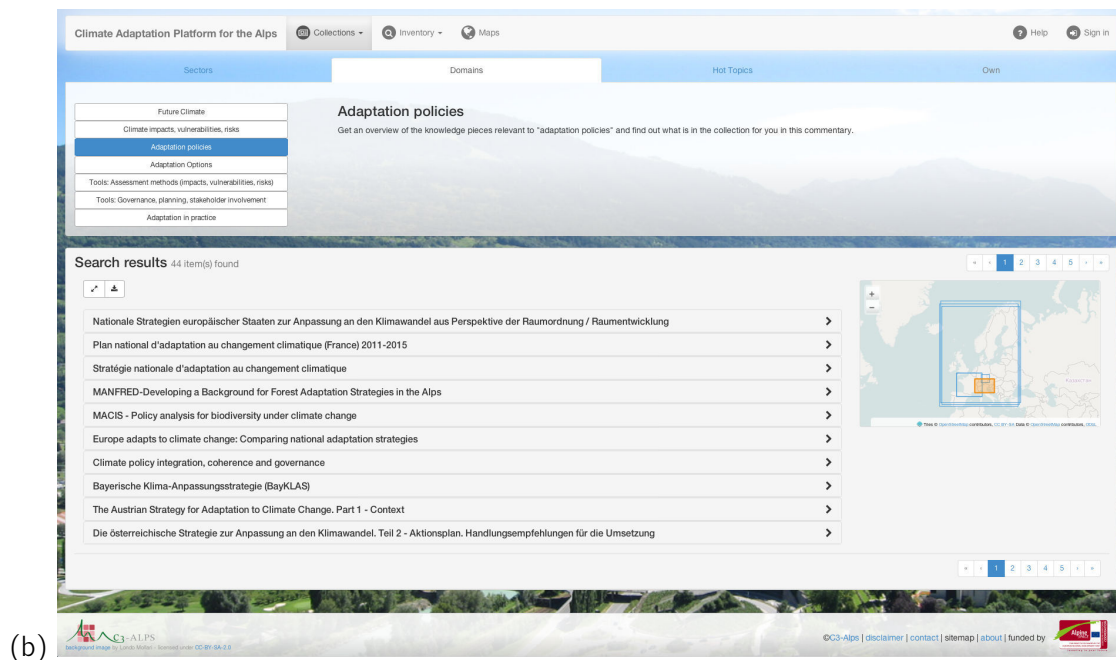


Figure H.2 – Les objectifs de la base de données sur l'adaptation au changement climatique générée pendant le projet C3-Alps : classer et faciliter l'accès à l'information Source : (a) Jochen Burgel/illustration : Simon Kneebone in [Dietachmair et al. \[2014\]](#), (b) <http://portal.c3alps.eu/>



risques et vulnérabilités, options d'adaptation, politiques d'adaptation, outils de gouvernance, outils d'évaluation des vulnérabilités, exemple d'application déjà réalisée pour l'adaptation), par secteurs (gestion de l'eau, agriculture, tourisme, foresterie, aménagement du territoire, etc.) et par région d'application dans l'espace alpin, les différents documents et études existants sur l'adaptation au changement climatique. Le moteur de recherche permettant une recherche ciblée et l'interface facile d'accès de la plateforme cherchent à permettre aux décideurs politiques ou citoyens de trouver efficacement l'information qu'ils recherchent et ainsi d'éviter le désintéressement du sujet par manque de temps ou par une complexité trop importante. En effet, la littérature sur les changements climatiques est riche et nombreuse. Le décideur politique n'a pas forcément ni le besoin, ni le temps et ni l'envie de feuilleter l'ensemble de cette littérature pour obtenir l'information nécessaire pour son territoire. La plateforme développée pendant C3-Alps cherche donc à simplifier les démarches volontaristes.

La deuxième synthèse réalisée pendant le projet C3-Alps est celle des politiques d'adaptation développées dans l'Espace Alpin. Partant du constat que les sept états ayant une portion de leur territoire dans l'Espace Alpin ne sont pas tous au même niveau de développement des stratégies d'adaptation au changement climatique, la synthèse réalisée pendant le projet souhaite recenser les différents documents politiques existants dans le domaine afin d'en évaluer les points forts et les points faibles. De cette synthèse et évaluation ressort des préconisations pour une gouvernance plus active dans le domaine de l'adaptation au changement climatique.

Les résultats de cette étude mettent en évidence les mêmes problèmes pour la mise en place d'une gouvernance efficace pour l'adaptation au changement climatique, que pour une communication efficace de cette problématique. Tout d'abord les décideurs politiques locaux perçoivent le changement climatique comme un phénomène lointain et donc non urgent. De plus les incertitudes perçues par rapport au changement climatique font que de sérieux doutes sont émis quant au retour sur investissements des mesures d'adaptation, phénomène aggravé par les horizons à courts-termes des politiques. Cette perception a des impacts importants dans la priorisation des problèmes par les politiques qui se fait d'autant plus ressentir lorsque des urgences comme des crises financières ou électorales occupent l'agenda politique.

La synthèse [[Menzel et Pütz, 2013](#)] montre aussi que la première attention portée sur l'atténuation du changement climatique, qui a été la réponse politique initiale au problème de l'impact des changements climatiques (*cf.* chapitre [C](#)), a en quelque sorte miné le terrain pour l'adaptation. Lorsqu'au niveau local des efforts ont été engagés pour contribuer à l'atténuation du changement climatique, il reste peu de motivation pour s'investir dans l'adaptation au changement climatique. Cela est d'autant plus vrai au niveau local où les financements pour traiter ces problématiques sont limités. Une des préconisations de la synthèse sur les gouvernances est donc de distinguer l'adaptation au changement climatique comme un domaine à part entière et de lui allouer des financements propres distincts des financements fournis pour l'atténuation.

L'absence de guides de mises en œuvre ainsi que des responsabilités mal définies et parfois chevauchantes sont des facteurs freinant le développement de politiques d'adaptation. Le manque de stabilité de l'administration, avec des changements fréquents d'institutions particulièrement vrai dans le domaine de la gestion de l'eau (*cf.* chapitre [A](#)) ainsi que l'absence de département étant clairement identifié comme responsable de la mise en place de politiques d'adaptation sont

également des freins au développement de telles politiques. L'ensemble de ces facteurs ajoutés à la perception du caractère non prioritaire du changement climatique par les politiques achève toute bonne volonté de mettre en place une gouvernance sur l'adaptation au changement climatique.

Ainsi le programme C3-Alps préconise quelques recommandations dans l'initialisation d'une gouvernance pour l'adaptation au changement climatique au niveau local. Il préconise notamment au stade embryonnaire de rassembler une masse critique de décideurs politiques un minimum conscients du problème du changement climatique et qui ont la volonté de s'engager dans un processus de développement de politique d'adaptation. Ces individus seront utilisés comme ressources clés pour diffuser le message et regrouper les décideurs politiques plus sceptiques quant à l'utilité du processus. L'autre clé du développement est également des finances allouées exclusivement à l'adaptation au changement climatique. Des lignes budgétaires claires et ciblées sur cette problématique sont indispensables pour motiver les décideurs politiques locaux à entreprendre le développement d'une gouvernance en faveur de l'adaptation au changement climatique.

Enfin, le projet C3-Alps identifie précisément un problème de langage entre les scientifiques et les décideurs politiques menant à de fortes incompréhensions. Côté décideurs politiques et acteurs du territoire, la connaissance scientifique est souvent jugée comme non exploitable directement pour une application de terrain. Trop de jargon, un manque de perspective pratique dans leur travail quotidien et dans leur capacité à communiquer les résultats ou à mettre en évidence la pertinence pratique de leurs recherches sont souvent énoncés comme critiques. Côté scientifique, les décideurs sont perçus comme n'ayant pas les connaissances suffisantes pour comprendre l'importance des enjeux liés aux changements climatiques et comme plus intéressés par des considérations politiques que des évidences scientifiques. Il ressort clairement de ces postures une incompréhension mutuelle et un problème de langage dans le dialogue. L'un ne recevant pas l'information qu'il espérait et l'autre échouant à faire passer son message. Il y a donc un chantier important à mener dans la communication entre scientifiques et décideurs pour mettre en place une gouvernance effective de l'adaptation au changement climatique.

La dernière synthèse réalisée pendant le projet C3-Alps est un calendrier reprenant un ensemble de préconisations pour le développement d'actions simples et de gouvernance en faveur de l'adaptation au changement climatique (figure H.3). Si cette publication a l'avantage d'être facile d'accès et attrayante, on peut lui reprocher d'avoir peu d'impacts dans les faits sur la mise en place concrète de mesures d'adaptation. Compte tenu des éléments démontrés dans la partie H - I de ce chapitre, il est peu probable que le fait de lire ce calendrier incite profondément les acteurs du territoire à s'engager dans l'adaptation au changement climatique. Ce calendrier a néanmoins le mérite de porter à connaissance des mesures d'adaptation simples et des bases de ressources complémentaires pour développer cette problématique. Il n'est pas en lui même un outil de mise en oeuvre de l'adaptation au changement climatique au niveau local.

## H - II - 2 Les sites pilotes pour la mise en place de l'adaptation au changement climatique local

Le projet C3-Alps a également développé des actions pour le développement de l'adaptation au changement climatique plus ciblées localement. Ainsi, ce sont treize sites pilotes qui ont été



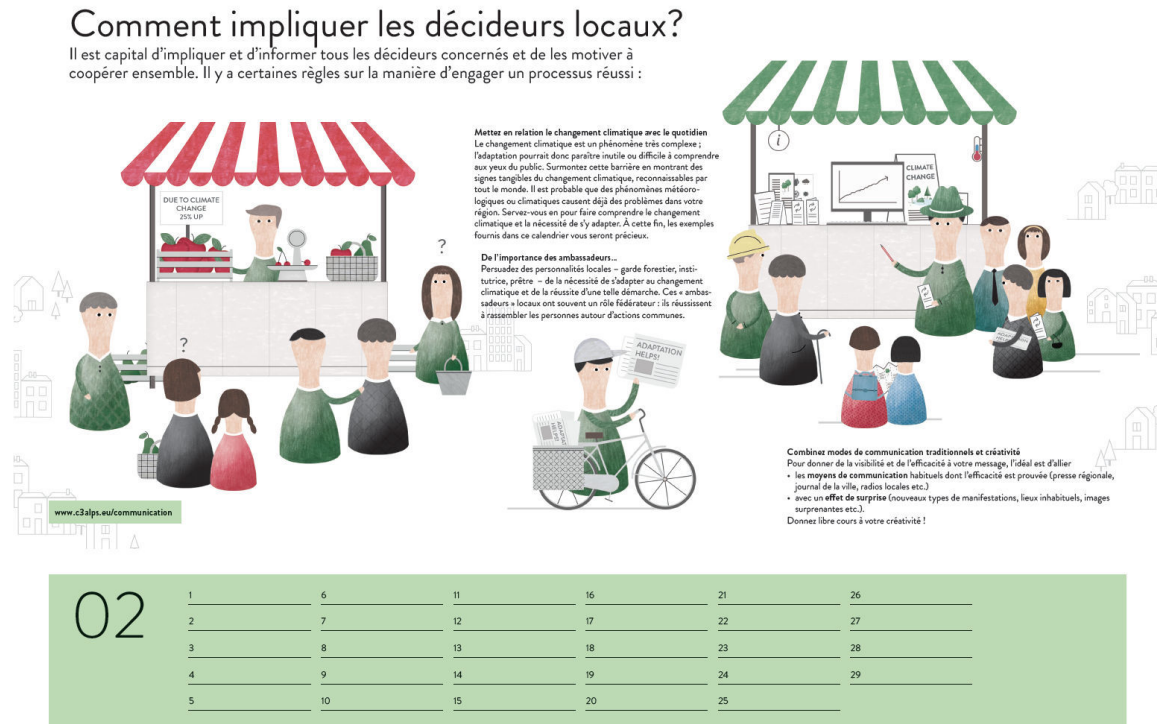


Figure H.3 – Ensemble de mesures préconisées par le programme C3-Alps regroupé sous la forme d'un calendrier distribué aux acteurs du territoire *Source* : [www.c3alps.eu](http://www.c3alps.eu)

mis en place dans les différents secteurs de l'Espace Alpin. Nous exposerons ici brièvement les résultats du site pilote de la Savoie dont nous étions responsables, les résultats des autres sites pilotes sont disponibles sur le site web du projet ([www.c3alps.eu](http://www.c3alps.eu)).

L'objectif du site pilote sur le département de la Savoie était de contribuer au développement d'une gestion durable de l'eau dans un contexte de changement climatique. Dans ce contexte, nous avons été invité par le Conseil Général de Savoie à participer à l'élaboration d'un schéma de conciliation des usages de l'eau sur la commune de Lans-Le-bourg et Lans-Le-Villard. Ce projet de nouveau document de planification à l'initiative du Conseil Général de Savoie montre l'émergence de la volonté d'initier un développement durable des communes du département. L'origine du projet vient de la constatation que le partage de la ressource en eau peut devenir problématique dans un futur proche compte-tenu des changements climatiques en cours. Les collectivités territoriales en imposant le développement de plan de gestion durable de l'eau obligent la concertation en amont des différents acteurs de l'eau. Ainsi pendant cette thèse un comité regroupant l'ensemble des acteurs de l'eau du territoire de Val-Cenis a été formé. Grâce à une étude quantitative de l'eau financée par le Conseil Général, des données fiables ont été mises à la disposition de ce comité pouvant servir de base de discussion concrète.

Les réunions du comité ont permis de faire se rencontrer les acteurs de l'eau du territoire ayant parfois des problématiques divergentes quant à l'utilisation de la ressource en eau. En discutant d'un sujet commun, à partir de données fiables et récentes, les problématiques de chacun ont pu être exposées. Ce simple stade permet de lever des idées préconçues et parfois erronées entre

acteur de l'eau et de faire émerger des points de tension et des solutions futures. Par exemple dans le domaine de Val Cenis, un accord a été passé entre EDF et le gestionnaire des remontées mécaniques pour ponctionner une certaine quantité d'eau dans la conduite forcée EDF pour être utilisée pour la neige de culture. Compte-tenu de l'augmentation des besoins en eau pour la neige de culture due à l'augmentation des températures, il a déjà été mentionné qu'une augmentation de ce prélèvement était à prévoir. La présence du responsable de la neige artificielle ainsi que du responsable EDF lors des réunions de comité a permis d'engager en amont de l'émergence de ce problème des discussions par rapport à cette possibilité. Un exemple similaire pourrait être évoqué quant à l'irrigation pour l'agriculture du Val Cenis.

Sans forcément évoquer le sujet en ces termes, cet exemple montre la voie pour l'émergence de gouvernance en faveur de l'adaptation au changement climatique en réunissant autour d'une même table l'ensemble des acteurs de l'eau d'un territoire afin qu'ils réfléchissent sur la durabilité de leurs pratiques en se basant sur des données scientifiques. Des initiatives comme celles-ci promulguent le développement de pratiques d'adaptation au changement climatique. Elles permettent ainsi aux territoires d'être mieux préparés et donc plus compétitifs face aux enjeux futurs. Cela représente également un bon exemple d'intégration et de dialogue entre scientifiques, collectivités locales et acteurs de terrain. Le succès de cette initiative est tout de même à relativiser par rapport au fait qu'elle est fortement soutenue et à l'initiative du Conseil Général. Actuellement en condition de réorganisation totale des collectivités territoriales, la mission de gestion de l'eau du Conseil Général est de moins en moins prioritaire et donc moins soutenue financièrement. Cette absence d'obligation et de financement entraîne un déclin des initiatives comme celle présentée ici qui est regrettable, les acteurs locaux n'ayant pas d'eux-mêmes l'initiative de projet comme celui-ci. L'échelon départemental et/ou régional apparaît donc comme un échelon approprié pour initier des actions locales reprises ensuite par les acteurs du territoire.

## H - III Conclusion

La communication des enjeux liés aux changements climatiques est une question délicate et difficile à aborder de par la nature des impacts et concepts associés à ces derniers. L'analyse des différentes pratiques de communication mises en œuvre depuis trente ans permet de mettre en avant certains écueils à éviter qui sont pourtant fréquents dans les techniques de transferts des connaissances entre Science et Société.

Le projet C3-Alps s'est efforcé de synthétiser par différents moyens, une connaissance déjà riche sur l'adaptation au changement climatique pour en favoriser l'accès aux décideurs politiques et aux acteurs du territoire. La démarche met en évidence la difficulté d'amener ces mêmes personnes à mettre l'adaptation sur leur agenda politique. Ainsi les synthèses réalisées malgré leur grande utilité présentent la faiblesse de ne pouvoir aider que les personnes déjà désireuses d'appliquer des préceptes de bonne gouvernance. Ce désir peut venir d'une volonté propre ou être initié par un échelon supérieur ayant tout de même un ancrage territorial fort, comme cela a été le cas pour le département de la Savoie. La question de comment impliquer d'autres personnes n'étant pas initialement préoccupées par les enjeux de l'adaptation au changement climatique reste donc entière. Dans le chapitre qui suit, nous présenterons une tentative innovante

de communiquer cette problématique afin de développer l'implication des citoyens et des acteurs locaux sur la question de la gestion durable de l'eau dans un contexte de changement climatique.

---

### Les Serious-Game, nouvel interface Science-Société ?

---

#### I - I L'émergence du projet

Lorsque le modèle GemEve a commencé à porter ses fruits et à se montrer pertinent comme outil d'aide à la décision pour l'adaptation au changement climatique, la question des possibilités de transfert et d'utilisation de cet outil s'est vite posée. Comment parvenir à transmettre les résultats d'un projet de recherche à une application pratique sur le terrain ?

La réponse passe forcément par une simplification de l'utilisation de l'outil. En effet en tant que concepteurs, nous avons codé le modèle à l'aide d'un langage informatique. Même en portant bien attention à réaliser un code clair et ordonné, il est complètement improbable que les acteurs du territoire ou les citoyens, souhaitent se pencher sur l'utilisation d'un programme rédigé de cette manière comme présenté dans la figure I.1. Dès lors nous avons cherché à concevoir un interface homme-machine, voire même Science-Société, qui permette de faire passer le message principal sans altérer la qualité de la donnée scientifique. C'est ainsi que l'idée de développer un jeu de plateau puis un Serious-Game s'est instaurée.

#### I - II L'utilisation du jeu dans l'apprentissage

L'utilisation de jeux éducatifs pour favoriser l'apprentissage, même si déjà très ancien et évoqué par Aristote, a connu un regain d'attention et de recherche à la fin des années 1970. Il part du constat que l'homme apprend tout au long de sa vie et non pas seulement dans un environnement dédié à cette tâche (école, formation, etc.). Dès lors, avec l'essor des jeux vidéos et des activités ludiques, des questionnements ont émergé sur les possibilités de transmettre des informations, de

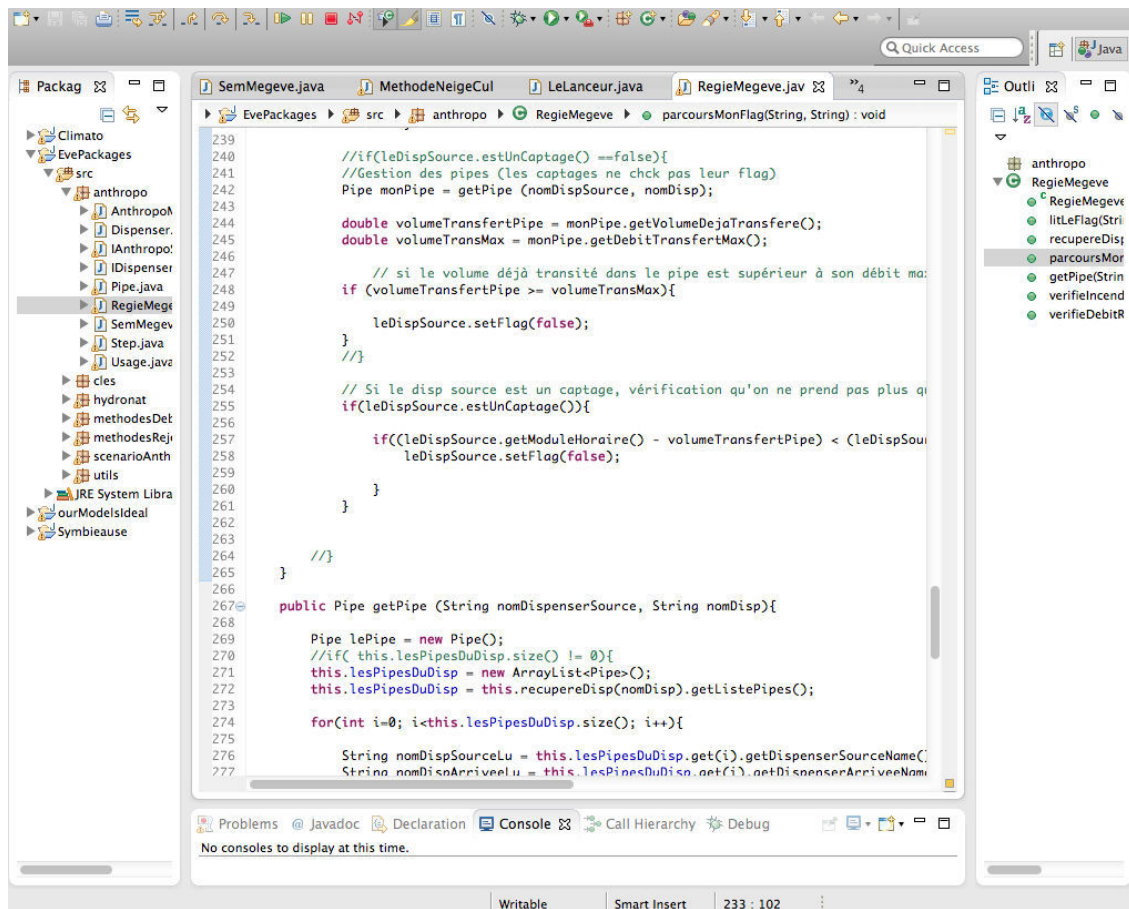


Figure I.1 – Ecran type du code développé pour le modèle GemEve

former et d'instruire les personnes à travers des outils initialement proposés pour le divertissement.

[Ruben \[1999\]](#) identifie plusieurs lacunes du modèle classique de transfert des connaissances c'est-à-dire d'un professeur (ou d'une personne détenant le savoir) à un apprenant. La première est de supposer que l'apprentissage nécessite forcément un enseignement. Or ce n'est pas le cas. Une personne peut s'instruire en discutant avec ses voisins, en regardant la télévision en lisant un livre etc. Le développement de la connaissance n'est donc pas contraint à la salle de classe ou de conférence. La deuxième limite au modèle d'apprentissage classique est que la connaissance est à distinguer de l'utilisation de la connaissance. Ainsi il ne suffit pas de savoir quelque chose pour forcément se l'approprier et changer son comportement en conséquences. Nous revenons ici avec les difficultés rencontrées pour la communication au changement climatique développées plus haut (cf. section H - I ). De plus savoir et s'approprier une connaissance requiert en général l'application, la répétition et la pratique du savoir acquis dans différents contextes et situations. C'est par ce processus que l'apprenant fait sienne la connaissance acquise.

Une autre critique de [Ruben \[1999\]](#) sur le modèle classique d'apprentissage est qu'il est unilatéral d'un savant vers un apprenant. Il n'y a pas de collaboration entre apprenants ce qui est très éloigné de l'acquisition de connaissances à l'extérieur de l'école où le processus est en général très social et collaboratif. Cette unicité de la relation savant-apprenant limite aussi la créativité de chacun. Il faut apprendre ce que le savant sait et rien d'autre. L'absence de collaboration et de créativité empêche le développement de connaissances parfois plus intéressantes pour résoudre un problème.

L'absorption passive de l'information délivrée par le savant engendre un manque de sens critique pourtant nécessaire désormais dans nos sociétés aux sources d'informations diverses et variées. Enfin [Ruben \[1999\]](#) termine sur le fait que le mode d'enseignement traditionnel a une capacité réduite pour prendre en compte la problématique des émotions et les liens entre le cognitif, l'affectif et le comportement pourtant essentiels dans le développement des connaissances.

Les limites du modèle traditionnel de transfert des connaissances regroupent parfaitement les enjeux de la communication du changement climatique envers les décideurs politiques et les citoyens. Cela est particulièrement vrai du fait que les cibles visées pour une évolution des comportements vers une acceptation des politiques d'adaptation s'adressent essentiellement à des adultes ayant depuis longtemps quitté les bancs de l'école. Dès lors il est vital de prendre en compte les méthodes d'apprentissage hors circuits traditionnels et de travailler sur les mécanismes favorisant l'utilisation des connaissances. Dans ce domaine, représenté par plusieurs formes (apprentissage en groupe, mise en situation, études de cas, etc.) les jeux éducatifs semblent être un atout majeur pour plusieurs raisons.

Le jeu possède des caractéristiques intéressantes pour le développement des connaissances personnelles sans enseignement. Premièrement, il permet au joueur d'expérimenter plusieurs choses dans un environnement protégé et non-agressif ainsi que de développer, d'explorer et de réfléchir sur différents aspects de son jeu et donc de lui-même [[Turkle, 1995](#)]. Il fournit des opportunités pour l'imitation et l'apprentissage grâce à des retours sur action directs, de l'imagination et des défis. Le jeu requiert l'engagement actif du joueur dans des environnements particuliers ce qui soutient la découverte, l'observation, les techniques d'essais et d'erreurs et ainsi développe les

capacités de résolution de problème [Dickey, 2005].

Ainsi l'application du jeu dans l'apprentissage autorise l'interactivité, promeut la collaboration et le sens critique. Le jeu permet d'adresser à la fois les fonctions cognitives et affectives de l'apprentissage et encourage l'apprentissage actif [Ruben, 1999]. Il semble donc être en mesure de répondre aux défis de la communication du changement climatique évoqué dans la section H - I .

Dans cette thèse nous avons d'abord testé une première approche du jeu comme outil de communication des travaux scientifiques sur l'adaptation au changement climatique. Celle-ci consiste en un jeu de plateau dont les règles seront explicitées. Une deuxième tentative réalisée en marge de cette thèse sera également présentée. Il s'agit d'un Serious-Game réutilisant le modèle développé pendant ces trois années.

## I - III Le jeu de plateau

L'utilisation de jeux de plateau pour expliciter et discuter des problèmes liés à la gestion de l'eau n'est pas une nouveauté. Dès les années 1980 quelques jeux sont développés pour adresser les problèmes liés à l'irrigation et au partage de l'eau [Carruthers, 1981] [Burton, 1989] [Steenhuis et al., 1989]. Avec l'essor des projets de recherche collaboratifs entre acteurs de terrain et scientifiques, le développement de jeux de rôle supportés par un plateau de jeu a connu un nouveau regain. Les jeux tels que WAT-A-GAME [Ferrand et al., 2009] ou NECC [Le Bars et al., 2004] développés au sein de l'UMR G-EAU de Montpellier ou encore River Basin Game [Lankford et al., 2004] illustrent bien ces dynamiques. Pour un approfondissement des jeux de plateau existants sur la gestion de l'eau, l'article de Ferrand et al. [2009] est conseillé ainsi que la consultation de la page référençant les liens vers les différents jeux sur le site internet de WAT-A-GAME<sup>1</sup>.

Le jeu de plateau développé dans cette thèse a été élaboré en collaboration avec Marine Piolat, médiatrice de culture scientifique et technique à Grenoble. Il se distingue des jeux déjà existants de différentes manières. Premièrement la plus grande partie des jeux de plateau déjà développés s'adresse à plusieurs joueurs afin de favoriser une compréhension commune des concepts de la gestion de l'eau. Le jeu est souvent utilisé comme outil de dialogue entre acteurs de terrain ayant parfois des objectifs contraires. Or, le jeu développé dans cette thèse s'adresse à un joueur unique. Son objectif est de le sensibiliser aux problèmes liés au partage de la ressource en eau et en particulier dans un contexte de changement climatique. La variabilité du climat et les choix de développement du joueur sont les principaux moteurs du jeu. Ainsi, il n'a pas pour vocation de supporter la coopération mais plutôt de susciter l'adhésion aux mesures d'adaptation au changement climatique et d'explicitier les obligations liées à la gestion de l'eau. Le jeu développé agit donc plus comme un élément de communication entre le citoyen et le scientifique que comme un outil d'aide à la décision.

1. <https://sites.google.com/site/waghistory/references>



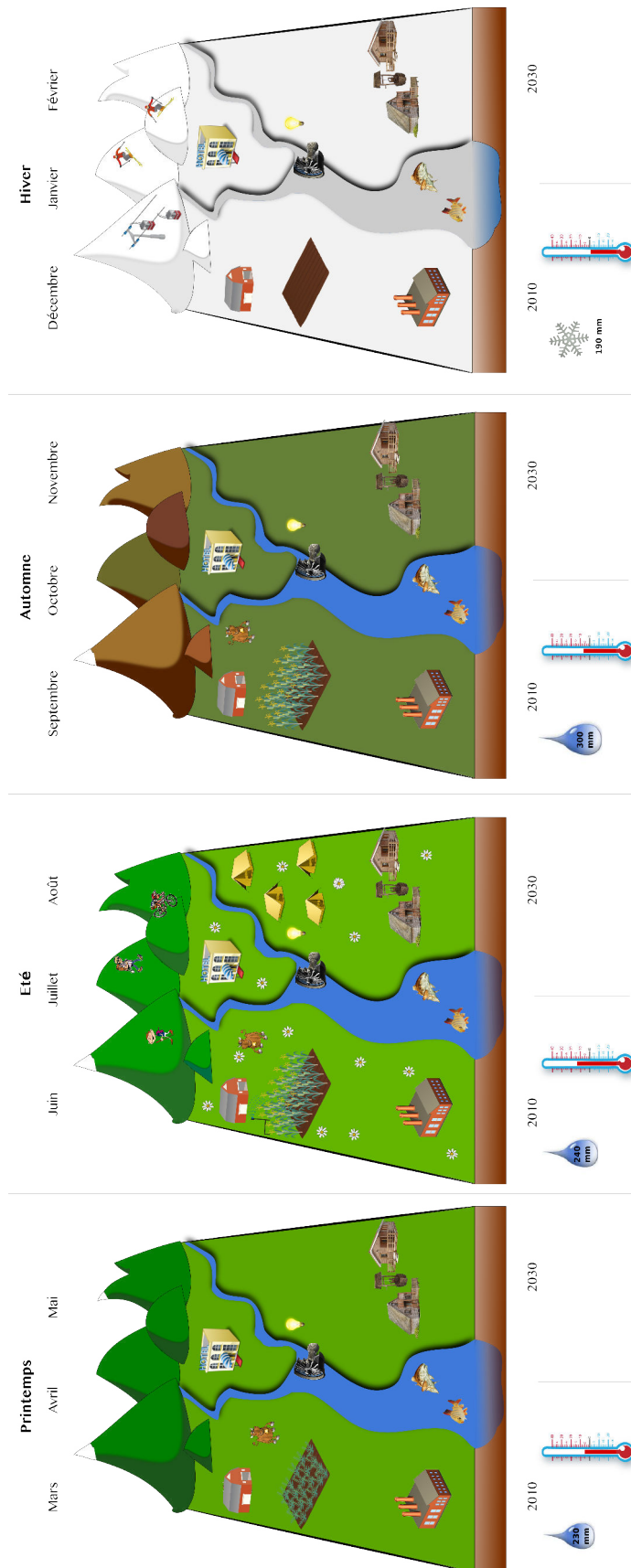


Figure I.2 – Plateau de jeu explicitant la difficulté de la gestion de l'eau dans un contexte de changement climatique. Source : Eve LEROY 2013



### I - III - 1 Les objectifs

L'objectif du développement du jeu de plateau est initialement de parvenir à faire comprendre la problématique de la gestion de l'eau dans un contexte de changement climatique. Le jeu doit donc être en capacité de présenter les choix auxquels le décideur doit faire face quotidiennement pour gérer l'eau durablement. Ainsi le jeu de plateau n'est pas destiné aux gestionnaires du territoire qui sont bien au courant de ces problématiques mais plutôt au citoyen lambda pour que celui-ci comprenne les tenants et les aboutissants de la gestion de l'eau et accepte mieux les choix faits en faveur de l'adaptation au changement climatique. Par extension de cette volonté, le jeu souhaite faire évoluer le comportement de chacun *vis à vis* de la gestion de la ressource en eau même si en tant que concepteurs nous sommes conscients que ce but ambitieux ne s'opèrera que sur quelques joueurs. De manière plus modeste le jeu doit permettre une réflexion sur la gestion durable des ressources en eau et sur les politiques d'adaptation au changement climatique dans ce domaine.

L'objectif est donc d'explicitier les concepts de disponibilité de la ressource et de demandes soumis aux contraintes climatiques et socio-économiques. Ainsi, il est supposé que la représentation de ces contraintes sous forme de jeu permette de mieux appréhender les enjeux actuels et futurs de la gestion de l'eau en montagne pour un large public. Le jeu développé souhaite promouvoir la sensibilisation et l'explicitation des différentes composantes du problème de la gestion de l'eau dans un contexte de changement climatique pour susciter le débat et promouvoir un développement économique durable.

D'un point de vue plus pragmatique, le joueur se positionne comme gestionnaire d'un territoire de montagne sur lequel plusieurs activités socio-économiques ont besoin de consommer de l'eau pour fonctionner. Le plateau de jeu est divisé en quatre saisons pendant lesquels certaines activités sont modifiées. C'est par exemple le cas pour l'hiver où les champs sont en jachère alors que les touristes viennent profiter des sports d'hiver. Les besoins en eau évoluent donc en conséquence sur le territoire.

La ressource en eau disponible provient des précipitations, comme c'est souvent le cas dans les hauts bassins versants de montagne (par exemple Megève). Le joueur a la possibilité de stocker de l'eau dans des réservoirs ayant une contenance déterminée. Le joueur doit répartir comme il le souhaite l'eau entre les différentes activités économiques de son territoire. Cependant il a des obligations légales à respecter et il n'est pas à l'abri de problèmes techniques ou de spécificités climatiques. Chacune des activités de son territoire sont importantes et utiles, le joueur doit donc faire des choix afin d'éviter la pénurie et le mécontentement de ses administrés.

### I - III - 2 Les règles du jeu

Une partie complète du jeu dure environ 40 min et se déroule de la manière suivante : Le plateau de jeu représente le territoire montagnard pendant les quatre saisons : automne, hiver, printemps et été (figure I.2). Pendant ces saisons une certaine quantité d'eau provenant des précipitations est disponible représentée par un volume d'eau défini.

Des activités humaines caractéristiques des activités socio-économiques de montagne sont réparties sur le territoire. Ces activités sont représentées par des réceptifs avec un besoin en eau précis. Le joueur grâce à l'eau disponible choisit d'alimenter ou non les activités du territoire. Il peut également choisir de stocker l'eau en prévision des saisons futures grâce à un réservoir à contenance déterminée. Seul le réservoir peut être utilisé d'une saison à l'autre comme complément à l'eau provenant des précipitations. Pendant le jeu le joueur tire des cartes qui représentent des incidents ou des opportunités d'activité pour le joueur. Par exemple : "une canalisation a cassé faute d'entretien, vous perdez la moitié de votre eau stockée". Il doit alors faire face à l'imprévu et s'adapter pour gérer au mieux son territoire.

Les activités socio-économiques sont représentées de la manière suivante au joueur afin que celui-ci fasse des choix conscients :

- *l'hydroélectricité* : fournit de l'énergie peu chère et peut rapporter de l'argent si le territoire produit plus d'énergie que ses besoins. Vous en priver revient à importer votre énergie d'une autre source et donc à la payer plus chère.
- *le tourisme* : permet de générer beaucoup de revenus et d'enrichir votre territoire. Le tourisme fournit de l'emploi pendant les saisons et génère une image positive de votre territoire à travers le monde. Cette activité apporte actuellement la moitié des revenus annuels du territoire.
- *l'agriculture* : permet de maintenir une population sur votre territoire toute l'année. C'est aussi une image valorisante de votre région grâce à des produits régionaux classés comme le fromage (beaufort, reblochon, etc.). L'élevage entretient votre paysage en permettant à la forêt de ne pas progresser trop vite.
- *l'industrie* : représente une forte entrée d'argent pour votre territoire. Elle permet également à vos citoyens de travailler et donc de rester dans votre commune. Sans industrie l'emploi est peu développé sur l'année et les habitants déménagent pour trouver du travail.
- *le milieu naturel* : représente l'obligation légale de laisser un minimum d'eau dans l'environnement pour maintenir l'écosystème de votre région. Ces débits minimaux servent à préserver la faune et la flore de votre belle région. En cas de non respect de cette norme, votre territoire sera sanctionné par la police de l'eau.
- *l'eau potable* : est une priorité absolue de votre travail de gestionnaire. Vous avez l'obligation légale de délivrer de l'eau à vos citoyens 7j/7 et 24h/24. En cas de pénurie répétée ceux-ci risquent de quitter votre ville.

Le jeu se déroule en deux rounds. La partie commence par les conditions climatiques actuelles. Les quantités d'eau disponibles par saison et les consommations des activités correspondent donc à la réalité actuelle. Le joueur commence par la première saison et grâce à l'eau disponible dans le milieu naturel remplit ses usages selon les obligations légales puis ses choix. S'il lui reste de l'eau, il peut choisir de la stocker pour la saison d'après. L'eau non consommée et non stockée ne peut pas être emmenée d'une saison à l'autre. A chaque saison, le joueur tire une carte qui va engendrer quelques modifications de sa gestion (tableau I.1). Au cours de la partie, le joueur devra faire des choix et comprendre qu'il n'est pas toujours possible de satisfaire tous les besoins du territoire et qu'une stratégie s'impose.

Table I.1 – Cartes à tirer, dans le jeu de plateau, à chaque changement de saison. Permet d'introduire de la variabilité tant sur les activités socio-économiques que sur les conditions climatiques et donc de l'imprévu dans les choix de gestion.

	Printemps	Été	Automne	Hiver
Round 1	Une entreprise innovante et génératrice d'emplois et de revenus pour votre commune souhaite s'installer. Elle a besoin de plus d'électricité pour fonctionner. La centrale électrique doit s'agrandir et nécessite 20 unités d'eau supplémentaire pour fonctionner. L'installez vous ?	Une canicule sévit dans les Alpes. La consommation en eau potable augmente de 2 unités d'eau et les champs nécessitent 1 unité d'eau supplémentaire pour ne pas perdre vos récoltes	Année très pluvieuse en automne. Vous récupérez 10 unités d'eau	Une canalisation a cassé faute d'entretien du réseau. Vous perdez la moitié de votre stock d'eau
Round 2	Vous installez un nouveau réservoir alimenté par la récupération des eaux de pluie. Le mois d'avril de ce printemps est très pluvieux Vous gagnez 50 unités	Le tour de France passe dans votre région 40 000 personnes sont attendues. Cela représente un fort potentiel de développement pour votre région	Un de vos réservoirs est pollué. Vous perdez 7 unités d'eau de stockage	Cet hiver est particulièrement sec. Il y a peu de neige. Pour faire venir les touristes et booster votre économie, il faut produire de la neige artificielle nécessitant 10 unités d'eau supplémentaires



Figure I.3 – Test du jeu pendant la fête de la science 2013 à Chambéry

Une fois les quatre saisons du premier round effectuées, l'animateur change les valeurs de précipitations et températures en bas du plateau de jeu par les valeurs du climat potentiel de 2030. Une explication sur l'origine de ces changements est donnée par l'animateur comme "l'augmentation des températures entraîne une fonte des neiges plus rapide et donc moins d'eau au printemps mais plus en hiver". Ainsi, l'eau disponible dans le milieu naturel pour satisfaire les activités humaines est modifiée par rapport au round précédent. Le joueur doit donc ici faire preuve d'adaptation aux changements climatiques. Quelques valeurs de consommation d'eau par les activités socio-économiques sont aussi modifiées comme la consommation en eau potable du village (qui s'est agrandi), la consommation de l'agriculture (qui nécessite plus d'eau d'irrigation du fait de l'augmentation des températures), l'augmentation des consommations pour le tourisme hivernal (du fait de l'augmentation du recours à la neige de culture) et les besoins du milieu naturel qui ont augmenté du fait du changement de la législation. Le joueur doit ici s'adapter aux changements socio-économiques de son territoire. Les deux points clés de la gestion de l'eau sont donc abordés dans ce jeu.

A la fin du jeu, un temps d'échange a lieu avec le joueur et des questionnements sont soulevés tels que :

- qu'avez-vous retenu de ce jeu ?
- cela a-t-il été facile de faire des choix entre les usages ?
- sur quels critères étaient basés ces choix ?
- en tant que citoyen, pensez vous être suffisamment impliqué dans ces choix ?
- comment pourrait-on mieux anticiper les risques de pénurie d'eau ?
- etc.

### I - III - 3 Mise en œuvre du jeu et résultats

Le jeu a été testé lors de la fête de la science 2013 à Chambéry. Il a reçu un bel accueil de la part des participants à cet évènement. Une trentaine de personnes ont pu s'exercer sur le jeu. Les

joueurs étaient plutôt des enfants d'une dizaine d'années accompagnés de leurs parents même si certains adultes allant jusqu'à un âge avancé sont venus tester ce jeu. La configuration de l'évènement plutôt constitué d'un public passant arrivant sur le stand à n'importe quel moment a fait que les deux rounds du jeu n'ont pas pu être réalisés et que les participants n'effectuaient que la partie représentant le climat actuel. Nous n'avons donc pas pu expérimenter l'effet du jeu sur la compréhension du lien entre changement climatique et besoin d'adaptation. Néanmoins l'ensemble des autres problématiques de la gestion de l'eau liée à la variabilité des besoins socio-économiques, des conditions climatiques et du cadre législatif ont pu être abordé. Il ressort ainsi plusieurs constats intéressants.

Tout d'abord, le jeu semble bien un media utile pour intéresser les populations aux problématiques scientifiques. Dans le cas présent il a permis d'explicitier facilement et de manière illustrée la notion de disponibilité de la ressource, de variabilité climatique, de choix de développement socio-économique ainsi que d'obligations législatives. En plaçant le joueur dans la position du décideur et donc du responsable de la bonne marche de son territoire, celui-ci se sent investi par les choix qu'il doit faire. Responsable de l'environnement dans lequel il évolue, le joueur doit s'adapter à des stimuli extérieurs (les cartes à tirer) pour maintenir son système. Par des essais et des échecs, le joueur construit lui-même sa connaissance et saisit peu à peu les différents concepts inhérents à la gestion de l'eau.

L'autre intérêt de ce jeu est qu'il n'y a pas de bonne ou de mauvaise stratégie et qu'il peut ainsi refléter les différents choix subjectifs faits par les décideurs politiques. Ainsi, certains joueurs préféreront développer l'agriculture aux dépens de l'industrie. Ce choix n'est pas jugé en tant que tel, l'important étant la cohérence tout au long du jeu du choix initial.

L'objectif du jeu de plateau est, rappelons le, de permettre une réflexion sur la gestion durable des ressources en eau et d'explicitier les concepts nécessaires à cette réflexion. Le temps d'échanges à la fin de la partie permet d'observer si l'objectif est atteint. Les réponses apportées par les joueurs à la question *comment pourrait-on mieux anticiper les risques de pénurie d'eau ?* fournissent quelques éléments de réponses. Certains enfants sûrement déjà impactés par des sensibilisations à la gestion de l'eau donnent des réponses d'ordre individuel comme *utiliser moins d'eau pour ma douche* ne montrant ainsi pas d'impacts particuliers du jeu tandis que d'autres s'inspirent directement de leur expérience du jeu en énonçant des réponses plus globales telles que *en ayant un réservoir d'eau plus grand, j'aurais pu stocker plus d'eau et aurais eu moins de problèmes*.

D'une manière générale, il apparaît que le jeu développé n'est pas adapté à un public de moins de 10 ans. Ce premier test, à la fête de la science, montre un potentiel intéressant du jeu pour illustrer les concepts inhérents à la gestion de l'eau. Le test mériterait donc d'être renouvelé dans une classe ou avec un public plus stable que lors de la fête de la science pour en étudier son plein potentiel, notamment par rapport aux problématiques du changement climatique et le faire évoluer en conséquence.

Néanmoins, même en apportant des modifications le jeu de plateau développé présente des limitations certaines. En effet le joueur ne peut pas visualiser directement l'impact économique ou sociologique de ses choix. Par exemple s'il choisit de ne pas développer l'agriculture sur son

territoire, le jeu ne lui permet pas de voir directement les impacts économiques et sociologiques de ce choix. C'est alors que le développement d'un Serious-Game sur le même principe que le jeu de plateau apparaît intéressant.

## I - IV L'adaptation de GemEve en Serious-Game

Fort du succès de l'utilisation d'un jeu de plateau pour expliciter les tenants et les aboutissants de la gestion de l'eau en montagne dans un contexte de changement climatique, nous nous sommes interrogés sur la possibilité d'amélioration du jeu notamment dans l'intégration de retours d'expériences directs entre le choix du joueur et les conséquences sur son territoire. C'est ainsi que l'idée d'intégrer le modèle GemEve dans un Serious-Game est apparue.

### I - IV - 1 Intérêt des Serious-Games

L'invention du terme *Serious-Game* est attribuée à Clark Abt qui utilise des jeux de rôle et des jeux de plateau comme outils d'apprentissage [Abt, 1987]. Par la suite c'est à Zyda et Sawyer qu'on attribue l'essor du terme Serious-Game comme on l'entend aujourd'hui c'est-à-dire l'idée de partir d'une base de jeu vidéo pour servir un propos sérieux, qui est en dehors du divertissement [Alvarez, 2007]. Alvarez compare le terme Serious-Game à un oxymore du fait que l'objectif est d'utiliser ce qui génère le divertissement dans un contexte qui par définition s'y oppose.

Si ce n'est pas le cas dans la définition initiale de Clark Abt, le terme Serious-Game actuellement fait forcément référence à l'utilisation d'un support vidéo. Le terme de Serious-Play est utilisé pour les autres types d'applications mobilisant le jeu comme outil d'apprentissage. Les jeux de rôles et jeux de plateau à but éducatif peuvent donc être insérés dans le terme Serious-Play. Le jeu de plateau développé et présenté précédemment (*cf.* section 1.2) se situe dans cette catégorie des Serious-Plays. Alvarez [2007] dans sa thèse va encore plus loin dans sa définition spécifique des Serious-Games en les distinguant des didacticiels et des applications ludo-éducatives et en les catégorisant en fonction de leurs interfaces ou par leurs règles. La lecture de sa thèse est conseillée pour un approfondissement de la notion de Serious-Game et de l'historique de son émergence. Nous nous consacrons ici à présenter les avantages de l'utilisation de Serious-Game dans la diffusion de savoirs scientifiques.

L'utilisation de la vidéo comme support du jeu et de l'apprentissage apporte plusieurs caractéristiques intéressantes pour le propos que nous servons à savoir l'expansion du soutien pour des mesures d'adaptation au changement climatique.

Premièrement, il permet de s'affranchir complètement de "l'instructeur" ou de l'animateur. N'importe quelle personne peut jouer et donc apprendre seule à n'importe quel moment de la journée. Cette caractéristique présente deux avantages : d'abord pratique, le Serious-Game peut être largement diffusé et utilisé sans contrainte, ensuite il permet au joueur de tester toutes les possibilités, même les plus farfelues et non conventionnelles sans risque d'être jugé ni par le formateur ni par les autres participants.

Deuxièmement les jeux de simulation permettent de faire le pont entre la salle de conférence et le monde réel selon [Gredler \[2004\]](#). Pour notre propos, l'utilisation d'un Serious-Game pourrait donc servir à diminuer le décalage entre production scientifique (le modèle GemEve ) et son utilisation pratique.

Enfin les jeux électroniques requièrent un engagement actif dans les environnements de jeux et permet un apprentissage *engagé* et non plus passif. Pour réussir sa mission dans le jeu, le joueur doit être motivé, concentré et développer un certain nombre d'aptitudes et de connaissances. Il peut également faire preuve de créativité et tester plusieurs stratégies pour finalement définir celle qu'il juge la meilleure.

[Prensky \[2004\]](#) énonce cinq principaux éléments enseignés par l'utilisation des jeux vidéos :

- Apprendre le *Comment*. C'est-à-dire que le joueur apprend comment se déplacer, comment entraîner son personnage, comment construire une cité, etc. Plus le jeu est proche du réel et plus l'apprentissage de "comment faire les choses" dans le jeu peut être réutilisé dans la vie quotidienne. La pratique de jeu vidéo développe des capacités externes au jeu comme l'analyse de données. Pour parvenir à son but, le joueur doit analyser constamment un environnement muni de beaucoup d'informations et les synthétiser pour pouvoir réussir. L'apprentissage du *comment faire* grâce aux jeux vidéos est bien illustré par les jeux de simulations de vol type Fligth Simulator. Si le joueur ne peut pas tout apprendre grâce à cela, il génère néanmoins de nouvelles connaissances et de nouveaux réflexes grâce à la répétition du geste et au décryptage des informations reçues.
- Apprendre le *Quoi*. C'est-à-dire que le joueur apprend ce qu'il doit faire et ce qu'il ne doit pas faire dans le jeu. Il apprend donc les règles du jeu. Contrairement au jeu classique où le joueur doit lire ou apprendre les règles avant de jouer, le jeu vidéo a la particularité que le joueur apprend les règles directement en jouant et donc en essayant et en échouant, apprenant ainsi ce qu'il peut faire et ne peut pas faire de manière empirique.
- Apprendre le *Pourquoi*. C'est-à-dire développer une stratégie pour parvenir à ses fins. Certains jeux développent des stratégies personnelles d'autres coopératives. D'autres montrent qu'une combinaison de mouvements est plus effective qu'un mouvement seul etc. Le développement de stratégies dans un jeu est utilisé depuis longtemps par les militaires pour entraîner leurs troupes. C'est d'ailleurs l'armée américaine qui la première a fait appel aux Serious-Game pour entraîner son armée [\[Alvarez, 2007\]](#). [Prensky \[2004\]](#) identifie plusieurs leçons découlant du développement d'une stratégie dans un jeu : l'apprentissage des causes et des effets, le fait qu'être gagnant à long terme est plus intéressant qu'une vision à court terme (cette leçon semble particulièrement importante pour notre propos), distinguer l'ordre dans le chaos, identifier des conséquences de deuxième ordre, analyser le comportement des systèmes complexes, identifier des résultats pouvant être contre-intuitifs et apprendre la valeur de la persévérance.
- Apprendre le *Où*. C'est-à-dire contextualiser l'environnement dans lequel le jeu se déroule. Tout en jouant, le joueur apprend les caractéristiques du monde dans lequel il évolue et les compare avec ses propres valeurs culturelles. Il fait constamment des comparaisons entre le monde virtuel et le monde réel ancrant ainsi son apprentissage dans la réalité.
- Apprendre *Quand* et *Comment*. [Prensky \[2004\]](#) identifie cet apprentissage comme définir des



actions réfléchies basées sur des valeurs morales, faire des actions bonnes ou mauvaises dans le jeu.

Ce résumé des compétences et des éléments qui peuvent être acquis par l'utilisation des jeux vidéos attestent de l'intérêt de développer un tel outil pour diffuser la connaissance scientifique sur l'adaptation au changement climatique.

Dans le domaine de la gestion de l'eau, il existe déjà quelques Serious-Games. A la frontière entre Serious-Game et Serious-Play, le *Sustainable Delta Game* développé aux Pays-Bas se joue en groupe et mélange les interactions entre jeu de plateau et support vidéo. L'objectif est de prendre des décisions pour la gestion de l'eau d'un delta pour favoriser un développement harmonieux et éviter les impacts négatifs tels que sécheresse et inondation. Le contexte est celui des pays-bas situés proches de la mer dans un delta. Deux Serious-Game à part entière se sont développés dans le domaine de la gestion de l'eau : *Catchment Detox* et *Aqua Republica*.

*Catchment Detox* est un Serious-Game gratuit en ligne développé par ABC, le service public (télévision, radio) Australien en 2008<sup>2</sup>. Le joueur doit gérer un bassin versant pour créer une économie durable. Il a le choix entre différentes options de développement en construisant des industries, fermes, favorisant la déforestation ou l'entretien des forêts, etc. Chaque action a un impact sur la consommation en eau et la productivité du territoire. L'objectif est d'obtenir un territoire en bonne santé financière, écologique et humaine. Une partie dure 100 tours représentant 100 ans. A chaque tour les décisions prises au tour précédent impactent les conditions du bassin versant. L'action se passe dans un territoire allant de la tête de bassin jusqu'à l'exutoire dans la mer. Il doit donc bien représenter les relations amont-aval. Selon leur site web, *Catchment Detox* repose sur un modèle scientifique développé par une collaboration entre le *CSIRO Division of Land and Water* et le centre de recherche coopérative *e-water*. Néanmoins, il ne nous a pas été possible de retrouver le modèle sur lequel se repose ce Serious-Game. La notice précise que bien que *Catchment Detox* soit un jeu et non pas un modèle scientifique, il se base sur la compréhension actuelle de la gestion de l'eau dans un bassin versant.

*Aqua Republica* est l'autre Serious-Game ciblant la gestion de l'eau. Il a été créé en 2012 par les nations unies<sup>3</sup> et se décline en plusieurs versions, certaines payantes, certaines gratuites. *Aqua Republica* est une simplification du monde réel où l'on doit développer un bassin versant en prenant en compte plusieurs acteurs de terrain. Le jeu se pratique seul ou en équipe. Le temps passant dans le jeu, les drivers changent comme la croissance de la population, le changement climatique ainsi que les actions des joueurs et obligent ainsi le joueur à s'adapter pour tirer le meilleur parti de son bassin versant. Comme pour *Catchment Detox* le jeu se base sur un système de tours subissant les impacts des décisions du tour précédent. Le modèle hydrologique en arrière plan du jeu est MIKE SHS un modèle physique distribué [Singh et al., 1999]. Depuis la création de ce jeu, les nations unies organise l'éco-challenge, une compétition entre jeunes collégiens utilisant *Aqua Republica* afin de sensibiliser à la gestion intégrée des ressources en eau<sup>4</sup>.

Les Serious-Game sur la gestion de l'eau sont toujours d'actualité puisque plusieurs projets

---

2. <http://catchmentdetox.net.au>

3. <http://aquarepublica.com>

4. <http://www.the-eco-challenge.org>



voient le jour. On peut notamment mentionner le projet I-Apples (Interface Application and Serious-Game) débuté en janvier 2013 qui a pour objectif de développer le Serious-Gaming pour sensibiliser aux besoins de changements dans nos comportements notamment dans le domaine de la gestion de l'eau. Ce projet Pan-Européen est dirigé par les Pays-Bas. Un autre projet qui vient de débiter, le *Nexus Game* témoigne de l'intérêt porté aux Serious-Game dans la gestion de l'eau. Ce projet a obtenu une bourse de 251 500 £ pour 2 ans afin de développer un Serious-Game sur la gestion de l'eau pour le Royaume-Uni.

Constatant les capacités d'apprentissage des Serious-Game dans la gestion de l'eau et la possibilité de les coupler avec un modèle scientifique, nous avons voulu au cours de ce travail tester la possibilité de développer un Serious-Game avec un modèle du type GemEve en arrière plan. Cela pourrait permettre de diffuser efficacement les résultats intéressants dégagés par le modèle GemEve aux citoyens mais également aux acteurs du territoire.

Le Serious-Game a été développé par Georges-Marie Saulnier et un groupe d'étudiants de l'université de Savoie en master 1 informatique.

## I - IV - 2 Développement du Serious-Game utilisant le modèle GemEve

Les objectifs du Serious-Game sont multiples car souhaitant s'adresser à différents publics. Le développement du Serious-Game proposé est consciemment orienté vers plusieurs publics qui ont des leviers d'actions différents :

- l'objectif du Serious-Game pour les citoyens est de permettre une appropriation des problématiques liées à la gestion de l'eau et du changement climatique afin que ceux-ci soutiennent lors d'élections ou de convocations publiques des mesures en faveur de l'adaptation au changement climatique. Nous cherchons ici à la fois à répondre à l'enjeu de responsabilité démocratique et l'enjeu humaniste de la diffusion du savoir scientifique comme évoqué dans le chapitre [H](#).
- l'objectif du Serious-Game pour les techniciens du territoire est de leur permettre de prendre les bonnes décisions aux bons moments. Ce jeu aurait donc plus un but d'amélioration des réactions à un stimuli extérieur pour une meilleure gestion de l'eau dans un territoire soumis au changement climatique.
- l'objectif du Serious-Game pour les politiques est de leur permettre de visualiser simplement et rapidement les retours sur investissements de leur politique territoriale. Ainsi le Serious-Game souhaite favoriser des décisions rationnelles pour le développement d'un territoire en permettant aux décideurs politiques d'expérimenter l'impact de leur politique dans les années à venir.

Le principe du jeu est typique d'un jeu de simulation comme SimCity. Le joueur se situe comme gestionnaire d'un territoire de montagne. Son objectif est d'attirer le maximum de citoyens dans sa ville. Ces derniers viennent s'installer dans la municipalité lorsque les conditions de ressources (ressources financières, ressources en eau, ressources électriques et ressources alimentaires) sont satisfaisantes et la pollution limitée (figure [I.4](#)). Le joueur doit donc gérer l'ensemble des fonctions de son territoire pour obtenir un développement harmonieux. Une partie dure virtuellement 100 ans. En début de partie le joueur choisit un scénario de changement climatique (faible, modéré,



Figure I.4 – Interface du Serious-Game et représentation de la population résidente par la taille du village. *Source* : Georges-Marie Saulnier 2014, communication personnelle

fort). Ce scénario va influencer sur les ressources en eau disponibles dans l'environnement. Le joueur devra donc s'adapter à ces évolutions pour maximiser la population finale de son village.

Pour parvenir à son objectif le joueur dispose de plusieurs moyens d'actions. Afin de produire suffisamment de ressources il dispose d'outils de construction (figure 1.4). Ainsi les fermes et greniers servent à produire de la nourriture, les centrales hydroélectriques de l'électricité, les hôtels et les industries servent à produire des ressources financières et enfin l'installation de réservoirs sert à produire des ressources en eau consommables.

A ces outils classiques et traditionnels des jeux de simulations sont ajoutés différents éléments représentant des choix de développement. Le joueur peut décider d'installer des outils de mesures pour connaître les précipitations et les températures de son territoire ainsi qu'un analyseur d'eau pour connaître son taux de pollution. Ainsi en investissant dans des outils d'analyse qui ont un coût, le joueur peut mieux suivre et anticiper les changements sur son territoire.

Pareillement il dispose d'un ensemble d'outils législatifs qu'il peut utiliser comme choix de développement pour sa municipalité (figure 1.5 (a)). Ainsi le joueur peut décider d'intensifier son agriculture, ce qui aura pour effet de nécessiter moins de champs pour récupérer des ressources alimentaires mais de générer plus de pollution et donc un besoin plus important en station d'épuration. A l'inverse il peut choisir une agriculture biologique, moins productrice mais plus respectueuse de l'environnement. D'autres choix politiques comme le développement important de l'industrie, du recyclage, l'augmentation des impôts locaux, etc. sont possibles. Le joueur doit trouver le meilleur équilibre pour attirer le plus d'habitants possibles.

Un marché a également été introduit dans le jeu (figure 1.5 (b)). Grâce à celui-ci le joueur peut acheter et/ou vendre des ressources. Ainsi il peut acheter de la nourriture à l'extérieur et exporter de l'électricité par exemple.

Le Serious-Game cherche à présenter au maximum les possibilités d'un territoire de montagne. Aussi il s'appuie sur un MNT réel (figure 1.5 (d)) dont toutes les zones ne sont pas constructibles (figure 1.5 (c)). Un certain nombre de données sont également accessibles au joueur pour le guider dans ses choix. Par exemple la consommation en eau mensuelle d'un hôtel peut être consultée ainsi que celle d'autres utilisateurs de l'eau en place sur le territoire. Ces données sont directement tirées du développement du modèle GemEve développé pendant cette thèse (cf. chapitre F). Ainsi l'ensemble des relations entre les ressources en eau disponibles actuellement et dans le futur et la consommation d'eau des usages sur le territoire du jeu se basent sur des travaux de recherche scientifique récents.

Fort de toutes ces informations et de toutes ces possibilités, le joueur doit développer la stratégie maximisant les ressources tout en maintenant un niveau de pollution raisonnable. C'est à ces conditions que les habitants viendront peupler sa ville. Les conditions environnementales évoluant avec le scénario climatique qu'il a choisi, il doit donc prendre en compte ces évolutions pour obtenir de meilleurs résultats et éviter les pénuries qui engendreraient le départ de ces citoyens.

A travers une approche ludique, ce Serious-Game permet de discuter un ensemble de sujets délicats et complexes. Le joueur en s'exerçant et en effectuant plusieurs essais visualise mieux

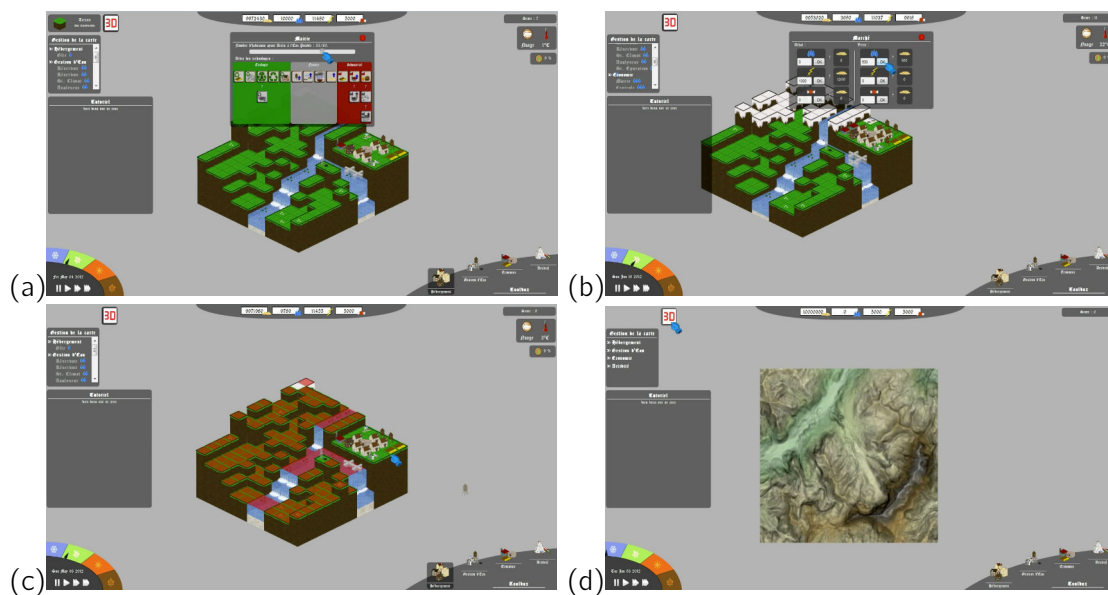


Figure I.5 – Différentes situations du Serious-Game : (a) utilisation de mesures législatives, (b) utilisation du marché, (c) zones inconstructibles en rouge, (d) MNT réel du bassin versant. *Source* : Georges-Marie Saulnier 2014, communication personnelle

les causes et les conséquences de ces choix en matière de développement. Il doit également mieux saisir les tenants et les aboutissants de l'environnement dans lequel il évolue ainsi que les impacts du changement climatique sur cet environnement. Le joueur va également développer des stratégies et faire des choix qu'il pourra ensuite transposer dans le monde réel.

Le Serious-Game apparaît donc comme un bon moyen à la fois de diffuser les résultats scientifiques sur la modélisation hydrologique et comme outil d'aide à la décision pour les techniciens et décideurs politiques ainsi qu'un outil de développement d'un esprit propice à l'adaptation aux changements climatiques.

Une première version de ce Serious-Game a été développée par Georges-Marie Saulnier et une équipe d'étudiants en master 1 informatique. Cette version a permis de montrer qu'un tel jeu est jouable et faisable mais il reste encore du chemin pour qu'il devienne un réel Serious-Game. Outre l'aspect graphique qui est essentiel actuellement pour l'attractivité d'un jeu, une quantification proche de la réalité des causes et des effets d'actions entreprises dans le jeu doit être réalisée. Ainsi combien un champ permet-il de production de nourriture ou l'impact d'une politique volontariste pour le recyclage par exemple doivent être étudiés afin de pondérer au mieux les actions du jeu.

Il est également important de développer un *gameplay* intéressant et attractif. Il s'agit de trouver le juste milieu entre un jeu trop complexe ou trop ennuyeux et trouver le meilleur *flow* (figure I.6). Le but est de trouver un équilibre entre l'anxiété générée par le jeu en lien avec les défis à relever et les compétences à acquérir pour relever ce défi. Le joueur doit trouver du plaisir à développer ses compétences et à les mettre en application. On parle alors d'expérience optimale [Toqué, 2014].

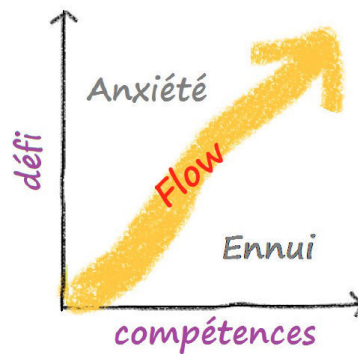


Figure I.6 – Le juste milieu à trouver pour susciter le *flow* chez le joueur. Source : [Csikszentmihalyi, 1997] in : [Toqué, 2014]

L'ensemble des recherches portant sur le *gameplay* du Serious-Game en projet reste à réaliser ainsi que toute la partie graphique. Néanmoins ce projet prometteur a suscité une grande adhésion à chaque fois qu'il a été présenté lors de conférences tant au niveau du citoyen que des décideurs politiques ou des chercheurs concernés par ces thématiques. Le Serious-Game sur la gestion de l'eau en conditions de changement climatique semble donc être une perspective intéressante à la fois pour diffuser la nécessité des mesures d'adaptation au changement climatique et pour expliquer et servir d'outil d'aide à la décision pour les territoires locaux.

Plusieurs versions du jeu peuvent être imaginées. Ainsi un Serious-Game à large diffusion pour le citoyen peut être créé à partir d'un bassin versant lambda. Ce jeu servirait à la pédagogie et à la sensibilisation à l'adaptation au changement climatique. Tandis qu'un Serious-Game "sur mesure" c'est-à-dire reprenant l'ensemble des données d'un territoire (consommations d'eau par les différents usages, structure du réseau d'AEP, disponibilités des ressources en eau, etc.) tel que développé sur le territoire de Megève dans le modèle GemEve, peut également être développé pour une municipalité précise. Le Serious-Game serait alors utilisé pour explorer les conséquences du changement climatique sur le territoire de la municipalité et tester différents scénarios de développement pour la commune. Le Serious-Game serait alors un véritable outil de prospective et un appui à la discussion, à la concertation entre décideurs politiques, techniciens et citoyens. Il permet de poser les bases d'un débat sain et éclairé sur le sujet du développement local en conditions de changement climatique en rendant accessible des connaissances complexes.

## I - V Conclusion

L'utilisation d'une interface ludique pour communiquer des résultats scientifiques vers un public plus large et diversifié semble être une solution efficace qui permette de contourner certaines difficultés de la communication des enjeux du changement climatique.

La création d'un jeu de plateau et le suivi de l'émergence d'un Serious-Game reprenant les concepts de gestion intégrée et durable de l'eau développés pendant cette thèse, confirment cet intérêt du développement d'interfaces ludiques. La complexité des relations entre acteurs de

l'eau, entres usages de l'eau et entres impacts des changements climatiques sur la gestion de l'eau, peut être plus facilement appréhendée par la pratique et la répétition d'actions dans le cadre protégé du jeu. Dès lors en permettant un apprentissage facilité des éléments du domaine de la Science par les différentes composantes de la Société qui les mettent en application, les interfaces ludiques apparaissent comme des innovations intéressantes à mettre en oeuvre, particulièrement pour des questions aussi prédominantes pour chacun comme le devenir de la gestion de l'eau.

Les possibilités offertes par ce type d'outils sont nombreuses et ouvrent des perspectives tant pour contribuer à la sensibilisation de l'adaptation au changement climatique que comme outil de prospective territoriale appliquée.



---

## Conclusion générale

---

Au début des années 1990, les scientifiques établissent un lien entre changements climatiques et activités anthropiques. Les Hommes en produisant des gaz à effets de serre influencent le climat. Un grand nombre d'études est alors lancé pour étudier les impacts de ces changements climatiques et définir la vulnérabilité des sociétés face à ces derniers.

Ces études ont montré que les impacts des changements climatiques ont et continueront à avoir des conséquences importantes sur nos sociétés. Les zones de montagne s'avèrent particulièrement sensibles et vulnérables à ces évolutions. Le chapitre B revient sur les changements climatiques déjà enregistrés dans les Alpes et sur ceux pronostiqués, ainsi que leurs conséquences pour la gestion de l'eau de ces territoires. L'augmentation des températures est le paramètre influençant le plus le fonctionnement des hydrosystèmes de montagne. Du fait de l'augmentation rapide des températures des Alpes, par rapport au reste de l'Europe, les quantités de neige diminuent par différents phénomènes (augmentation de la part des précipitations liquides, accélération de la fonte, etc.). Cette diminution provoque des modifications des hydrosystèmes alpins notamment sur la temporalité des périodes de hautes eaux et d'étiages ainsi que de leurs intensités. Ainsi les valeurs historiques utilisées pour baser la gestion de l'eau quotidienne ne sont plus suffisantes pour appréhender un nouveau contexte climatique.

Constatant la vulnérabilité de nos sociétés aux changements climatiques, la communauté internationale réagit. Le chapitre C expose l'historique et les différentes réponses politiques apportées. La première réaction fut de chercher à supprimer ou diminuer l'augmentation du réchauffement global. Pour ce faire, il est nécessaire que l'ensemble des pays prenne des mesures pour réduire les gaz à effet de serre. C'est ainsi que de nombreuses politiques d'atténuation du changement climatique ont été engagées.

Malheureusement après 20 ans de négociations, force est de constater que les politiques d'atténuation ne sont pas suffisantes. La quantité globale de gaz à effet de serre est en constante augmentation entraînant une augmentation des températures moyennes maintenant inévitable.



L'objectif est désormais d'essayer de limiter ce réchauffement et de le contenir à une augmentation de +2°C d'ici la fin du siècle. Les sociétés devront donc s'adapter à de nouvelles conditions climatiques maintenant inéluctables.

C'est ainsi qu'à la fin des années 2000 l'adaptation prends autant part que l'atténuation aux négociations internationales. L'adaptation se définit comme l'anticipation des impacts du changement climatique, pour en limiter les dommages potentiel et si possible tirer partie autant que possible des changements inéluctables qui auront lieu.

Plusieurs études destinées à évaluer le potentiel d'adaptation aux changements climatiques des territoires voient le jour. Dans les Alpes des projets sont lancés sur différentes thématiques (le tourisme, la gestion des ressources, l'aménagement du territoire, les risques naturels, etc.). Ces derniers produisent de nombreuses informations, nouvelles et utiles, pour le développement de l'adaptation aux changements climatiques dans les Alpes mais échouent à inciter les acteurs territoriaux à s'en saisir et à les mettre en œuvre.

C'est ainsi que naît le projet C3-Alps, de l'Espace Alpin, qui a financé cette thèse. Ce projet signifiant *Capitalising Climate Change knowledge for adaptation in the Alps*, avait pour objectif de capitaliser les connaissances acquises pendant les précédents projets d'adaptation pour les mettre directement en œuvre sur le terrain. Un des aspects abordés par ce projet est le transfert de connaissances entre les producteurs de connaissances (souvent scientifiques) et les acteurs de terrain qui peuvent les mettre en œuvre.

Responsable de deux sites pilotes (Megève et le département de la Savoie) pour C3-Alps dans le domaine de la ressource en eau, nous étions chargés de trouver des réponses pour l'appropriation des connaissances par les acteurs territoriaux et pour contribuer à la mise en œuvre concrète de l'adaptation au changement climatique dans ce domaine. Le choix a été fait d'aborder la question de la bonne gestion de l'eau, actuelle et future, par l'aspect quantitatif. C'est à dire que l'on considère que la gestion est bonne si en respectant l'ensemble de la législation, la totalité des usages de l'eau d'un territoire a pu satisfaire ses besoins en eau. Ainsi si des pénuries apparaissent dans la gestion actuelle ou dans la gestion future, la gestion de l'eau n'est pas considérée comme durable et intégrée. Le chapitre D définit les différentes sources de pénuries possibles sur un territoire et évalue les besoins pour pouvoir étudier cette problématique et son adaptation. Ces besoins passent forcément par la représentation de deux facettes indissociables de la gestion durable et intégrée des ressources en eau : les activités socio-économiques et ses interactions avec le milieu naturel. La possibilité de visualiser l'impact des choix de développement et des changements climatiques sur cette gestion est également un élément essentiel. Ce chapitre présente donc le choix méthodologique de cette thèse pour répondre à ces questionnements : la modélisation.

La modélisation hydrologique est un outil souvent utilisé pour explorer les conséquences des changements climatiques sur les ressources en eau. Dans cette thèse, un module socio-économique a été développé pour dialoguer avec un modèle hydrologique afin de représenter les interactions entre milieu naturel et activités anthropiques d'un territoire. Le modèle hydro-anthropique ainsi développé s'inscrit dans le champs disciplinaire des modèles hydro-économiques et a la particularité de pouvoir à la fois être utilisé en optimisation et en simulation. L'originalité

de la démarche est également dans la construction d'un modèle couplant de manière dynamique représentation socio-économique et représentation du milieu naturel d'une manière modulaire mais également facilement modifiable. Ainsi l'utilisation du langage orienté objet JAVA permet au-delà de cette thèse de continuer à faire évoluer cette première construction du modèle au gré des progrès des connaissances dans les différents domaines abordés. Il offre également un moyen souple d'intégrer les différentes communautés de chercheurs en sciences de l'environnement et en sciences humaines et sociales.

Le modèle développé est donc constitué de deux modules, l'un hydrologique représentant le fonctionnement du milieu naturel, l'autre socio-économique représentant les activités du territoire, couplés dynamiquement. Les pronostics du module hydrologique servent de forçages au module anthropique qui à son tour force le module hydrologique. Le fonctionnement de ce modèle couplé est décrit dans le chapitre E.

En intégrant des scénarios climatiques et socio-économiques, les impacts des changements climatiques et l'impact des choix de développement sur la gestion de l'eau d'un territoire peuvent être quantifiés grâce au modèle. C'est par ces résultats que ce dernier souhaite contribuer à l'adaptation aux changements climatiques.

L'apport majeur de cette thèse est donc la construction d'un module socio-économique prenant en compte l'organisation du réseau d'adduction d'eau potable, les demandes en eau de chaque usage et les règles de gestion d'un territoire. Il existe à notre connaissance peu ou pas de modèles pouvant à la fois prendre en compte la représentation hydrologique du milieu naturel, la représentation technique des infrastructures du réseau d'alimentation en eau, la représentation des règles de gestion légales et locales ainsi que les consommations d'eau des usages pour les mettre en interaction dynamique.

Cette première conception de modèle couplé a été appliquée à la municipalité de Megève. Cette ville de moyenne montagne largement orientée vers le tourisme hivernal est particulièrement sensible et vulnérable aux évolutions climatiques. C'est également un site pilote de C3-Alps qui possède de nombreux avantages pour l'application du modèle couplé. Il est instrumenté et donc suivi hydrologiquement depuis 2009 suite à différents projets. Un modèle hydrologique, de la famille TOPMODEL, a déjà été développé sur ce bassin versant. La réutilisation de connaissances déjà disponibles réponds ainsi aux objectifs du projet C3-Alps. Megève est également une municipalité qui suit de manière assez fine ses prélèvements et distributions d'eau autorisant ainsi une comparaison plus aisée des simulations du modèle avec les données mesurées sur le terrain.

Le modèle développé s'appuie donc sur les caractéristiques de Megève mais n'a pas pour vocation de représenter exactement le fonctionnement de cette municipalité. L'objectif de l'application est en effet d'éprouver le fonctionnement du modèle et son utilité pour l'adaptation aux changements climatiques. Ainsi l'objectif était d'utiliser des données relativement faciles à obtenir et d'estimer les ordres de grandeurs et la saisonnalité des prélèvements dans une station de ski de moyenne montagne. De fait, l'organisation et le fonctionnement du modèle ne sont pas le reflet exact de la réalité de Megève. C'est ainsi qu'une distinction est faite dans la thèse entre Megève et GemEve. GemEve est une ville non réelle qui ressemble très fortement à Megève mais qui diffère sur certains points du fait des connaissances non exhaustives sur le fonctionnement de

la gestion de l'eau de ce territoire.

En comparant les résultats de GemEve aux mesures de Megève sur trois années, la robustesse du modèle créé a été démontrée dans le chapitre F. Malgré des données parcellaires et des hypothèses de fonctionnements d'usages plus approximatives que dans la réalité de Megève, les résultats montrent que GemEve représente bien les caractéristiques d'une station de moyenne montagne tant en volume qu'en saisonnalité.

La validation du modèle sur la période actuelle autorise son utilisation pour l'optimisation et la simulation. L'utilisation du modèle s'avère intéressante pour optimiser la distribution d'eau. Cette partie très peu développée dans cette thèse est une perspective d'application opérationnelle du modèle. En effet, en représentant l'ensemble des réservoirs, captages et conduites d'un territoire ainsi que les règles qui les régissent le modèle est capable de calculer la distribution la plus optimale. Pour rendre efficace cette fonction d'optimisation, il faudrait inclure le coût de la distribution (la distribution gravitaire étant moins chère que la distribution provenant d'un forage, qui nécessite de l'électricité pour pomper l'eau, par exemple) pour rendre compte réellement de la réalité du territoire. Ainsi le modèle pourrait calculer en fonction du coût et d'autres problématiques techniques et pratiques la meilleure distribution pour un réseau. L'utilisation du modèle en optimisation peut également être particulièrement pertinente lors de situations de crises. En effet lors de la panne d'un captage ou de la pollution d'un réservoir, qui peuvent parfois prendre plusieurs mois à réparer, le modèle est capable de proposer rapidement les meilleurs plans de secours prenant en compte une multitude de facteurs. Il y a donc un véritable potentiel d'utilisation du modèle en mode optimisation opérationnelle qui n'a pas été exploré pendant cette thèse.

La vocation première du modèle est l'exploration de l'impact des changements climatiques et des choix socio-économiques sur la gestion de l'eau via des simulations. Le chapitre G présente les impacts des changements climatiques prévus en 2050 sur la gestion actuelle de l'eau sur une station de moyenne montagne. Ces derniers seront particulièrement importants notamment pour l'usage neige de culture. Le chapitre présente ensuite les possibilités de fonctionnement du modèle pour tester la résilience du modèle économique actuel de stations de moyennes montagnes face aux évolutions climatiques. L'utilisation en mode prospective territoriale pure, c'est à dire comment le modèle peut être utilisé pour tester la faisabilité de nouveaux modèles économiques, est également abordée. A ce niveau d'exploration, l'implication des décideurs politiques est essentielle afin d'établir des scénarios anthropiques cohérents, faisables politiquement et qui présentent un intérêt pour le territoire étudié. Pendant cette thèse, en l'absence de l'expertise de décideurs politiques, deux tests de scénarios anthropiques prospectifs (développement du tourisme estival et développement l'hydroélectricité) ont été réalisés pour valider le fonctionnement technique du modèle mais il est nécessaire que les décideurs politiques s'emparent de cette question afin de tester des plans de développement plausibles. Le modèle développé peut permettre également lors d'ateliers de co-construction de scénarios anthropiques avec les acteurs territoriaux, comme ceux produits par le projet MontanAqua de chiffrer et d'analyser les impacts de ces choix.

Ces expérimentations ont permis de valider l'utilisation du modèle pour explorer à la fois les impacts des changements climatiques sur la gestion de l'eau mais également des choix de développement économique. Ne se substituant en aucun cas à la décision politique il contribue à présenter de manière objective les avantages et les inconvénients des différents choix pouvant aller,

lorsque les données sont disponibles, jusqu'à chiffrer le coût de la résilience et/ou de l'adaptation d'un territoire dans le domaine de la gestion de l'eau.

Suite à cette première expérimentation, de nombreuses perspectives d'évolution de ce modèle sont envisagées. Il semble important d'intégrer les questions de qualité d'eau dans le modèle, actuellement uniquement axé sur les aspects de gestion quantitative. Cette notion de qualité est essentielle tant dans la gestion quotidienne de l'eau (les gestionnaires ont pour obligation de fournir une eau en quantité suffisante et de qualité à chaque citoyen) que pour la prise en compte du milieu naturel. La préservation de la biodiversité dans le réseau hydrographique et dans les zones humides, pourrait être abordée de manière plus opérationnelle et appliquée autrement que via les débits réservés grâce à cette notion de qualité de l'eau.

Une meilleure quantification des consommations réelles des habitants mais surtout des touristes est également une voie d'amélioration du modèle. Malgré le fait que ces derniers représentent une part importante de la consommation en eau des communes touristiques de montagne, des statistiques et des mesures de leur consommation réelle ne sont pas disponibles ni même réalisées. C'est d'ailleurs un des axes de recherche de la thèse de Martin Caliano sous la direction d'Emmanuel Reynard (UNIL) actuellement en cours. Cette connaissance plus fine des consommations d'eau potable par personne et selon leur profil (habitant, touriste journalier, touriste de luxe, etc.) permettrait de quantifier un panel de stratégies d'adaptation actuellement en développement. Il serait par exemple possible d'évaluer l'impact de politiques de l'eau innovantes imaginées, comme des stratégies d'économie d'eau ou de recyclage des eaux usées (bâtiments éco-responsables, par exemple) sur les possibilités de maintien ou de développement de l'activité touristique en montagne.

De même, dans un marché promouvant la transition énergétique et les énergies renouvelables, il y a un intérêt à complexifier la connaissance du fonctionnement optimal des micro-centrales dans les municipalités de montagne. Il serait ainsi possible d'évaluer les potentiels de production de ces dernières et l'intérêt du développement de l'hydroélectricité dans les stratégies d'adaptation.

Parallèlement aux évolutions de calcul des besoins en eau des usages citées précédemment, il serait particulièrement intéressant de développer des scénarios climatiques continus allant de la période actuelle jusqu'en 2050 pour pouvoir interpréter les points de ruptures majeurs dans le développement économique actuel des stations de moyennes montagnes.

L'amélioration des connaissances et du suivi du manteau neigeux sont aussi des données physiques pertinentes à inclure dans le modèle. En effet cet élément est essentiel dans les évolutions des quantités d'eau disponibles des territoires de montagne et donc dans la gestion des ressources en eau. Ce sujet est actuellement abordé en partie dans la thèse également en cours de Pierre Spandre sous la direction de Samuel Morin (CEN) et pourrait contribuer à l'amélioration du modèle.

Il existe donc des développements techniques du modèle particulièrement intéressants à mettre en œuvre dans les recherches futures. La construction modulaire et flexible du code informatique du modèle permet de réaliser facilement ces améliorations et ainsi de continuer son développement.

Néanmoins une limitation certaine du modèle, même après un certain nombre d'améliorations est qu'il ne peut être utile que si les acteurs du territoire s'en saisissent. L'outil fonctionne mais s'il n'est pas utilisé, peu importe sa qualité, son impact restera moindre.

C'est ainsi que parallèlement à la réponse aux problématiques techniques et scientifiques, cette thèse s'est interrogée sur le transfert des connaissances produites aux acteurs du territoire, véritable clé de voute de la mise en œuvre de l'adaptation aux changements climatiques. La prise en main du modèle à la fois par les décideurs politiques, les techniciens territoriaux, les citoyens, etc. est nécessaire pour répondre aux défis de l'adaptation. Ainsi d'abord en interrogeant l'organisation administrative de la gestion de l'eau en France le chapitre A montre que la complexité de cette dernière induit une grande difficulté à trouver un interlocuteur ressource qui permettrait de diffuser l'information. Si la gestion administrative cherche à promouvoir la participation de tous à chaque échelon de décision, la multiplicité des institutions ainsi qu'un chevauchement de leurs compétences entraîne une lisibilité compliquée et fastidieuse qui nuit à l'application opérationnelle des principes clés de la gestion intégrée et durable des ressources en eau. La refonte des institutions liée à la décentralisation cherche à permettre une meilleure déclinaison territoriale de la planification décidée au niveau des grands bassins versants. Néanmoins, elle engendre de nouvelles institutions qui viennent complexifier un peu plus un paysage administratif déjà difficile à appréhender. Il est ainsi particulièrement difficile dans ce contexte de trouver une passerelle entre scientifiques et législateurs/administrateurs pour promouvoir l'adaptation aux changements à travers tous les échelons de cette organisation.

En étudiant dans un second temps la complexité de l'interface entre Science et Société, le chapitre H montre qu'il est particulièrement difficile de communiquer des enjeux du changement climatique. Il apparaît notamment important de ne pas tomber dans une surenchère d'illustrations catastrophiques et de favoriser l'implication des publics abordés par l'attachement à des problématiques locales.

Ainsi, après avoir réalisé plusieurs synthèses pour le projet C3-Alps, ayant essentiellement pour but de simplifier l'accès à une connaissance déjà existante aux personnes en ayant un besoin concret, nous avons fait le choix dans cette thèse d'interroger la question du transfert des connaissances sous un angle nouveau. En cherchant une démarche généraliste qui permette d'interpeller l'ensemble des différents acteurs (citoyens, décideurs, administrateurs, techniciens, etc.) et qui promeut une connaissance objective du territoire, le projet d'utilisation de Serious-Games a émergé.

Le développement d'interfaces ludiques (e.g. un jeu de plateau et un Serious-Game) reprenant les principes du modèle développé et présenté dans le chapitre I s'avère efficace pour permettre à la fois l'émergence du thème de l'adaptation chez les citoyens et les décideurs politiques qui en ont une notion plus ou moins vague et l'utilisation des dernières avancées scientifiques par les différents acteurs du territoire.

De manière générale, la création d'une interface permet de faciliter l'appréhension d'un nouvel outil et de s'en approprier les enjeux. La répétition d'une partie de jeu par exemple favorise l'apprentissage des causes et des effets de chaque action dans le jeu. Cette caractéristique est particulièrement intéressante pour l'adaptation aux changements climatiques. En jouant ou en

utilisant l'interface graphique, qui contient les réelles données scientifiques, le joueur va développer une connaissance plus fine du système dans lequel il évolue et donc une capacité d'amélioration de ses conditions de vie globales plus importante. Ces connaissances acquises pendant le jeu sont ensuite directement transférables et utilisables dans la vie quotidienne. Ce transfert se fait de manière plus ou moins consciente mais promet de belles perspectives pour le développement des Serious-Games comme en témoignent les nombreux projets dans ce domaine.

Les interfaces développés pendant cette thèse se basant sur le modèle scientifique précédemment explicité, constituent également des points intéressants pour éclaircir un débat parfois houleux et irrationnel entre utilisateurs de l'eau en concurrence ou non. En permettant à chacun d'analyser les fonctionnements et les besoins en eau des différentes activités socio-économiques du territoire, ces interfaces permettent de mieux appréhender la question de la gestion intégrée de l'eau au niveau local et parfois de désamorcer des idées préconçues par rapport à certains usages de l'eau. Ils favorisent un débat plus sain et basé sur de réelles données scientifiques. En ce sens, ils peuvent être utilisés comme outil de concertation lors de l'élaboration de document de planification. Cela peut être intéressant dans le contexte actuel d'émergence de la prise en compte de l'adaptation aux changements climatiques dans les plans territoriaux qui mettent autour de la table une multiplicité d'acteurs et devant inclure une vision prospective à long terme.

Après ces premières expérimentations, il est maintenant nécessaire d'envisager une diffusion de ces nouveaux outils à travers différents canaux afin qu'ils puissent servir effectivement aux différentes applications citées précédemment. Ainsi pour les Serious-Games le développement d'une version du jeu de plateau ou du jeu vidéo pour les scolaires semble un bon moyen de sensibiliser les jeunes générations à ces questions de gestion de l'eau. De même, les Serious-Games offrent de nombreuses possibilités de diffusion grâce à des versions web qui permettraient de rendre accessible les connaissances scientifiques développées dans le modèle au citoyen.

Du point de vue de la diffusion du modèle hydro-anthropique développé dans cette thèse auprès des techniciens et décideurs du territoire, il peut être également imaginé la création d'un interface gestionnaire afin qu'il devienne un outil de gestion opérationnelle connecté à la télémétrie et pouvant donc gérer en temps réel le réseau d'alimentation d'une municipalité. Le développement de cet outil opérationnel pourrait se substituer aux outils de gestion déjà existants tout en ayant l'avantage d'inclure un système de prospectives. Il pourrait ainsi contribuer à améliorer la gestion opérationnelle de l'eau sur un territoire donné à la fois en optimisation et en simulation.

Ces perspectives d'évolution des interfaces au modèle hydro-anthropique nécessitent la mise en place d'équipes projets incluant des informaticiens, des développeurs de jeux, etc. pour répondre à l'attente sociétale face à ces problématiques. Il y a donc encore un pas à franchir pour concrétiser ces premières expérimentations prometteuses.

La question du transfert du modèle à d'autres échelles est également intéressante à interroger. En effet, le modèle développé ne prends pas en compte les besoins en eau des territoires en aval. Dans un environnement climatique modifié la question de l'hydrosolidarité des territoires amont envers les territoires avals risque de se poser de manière plus intense. Ainsi, il est annoncé une augmentation de la fréquence et de l'intensité des canicules dans l'espace méditerranéen. Dans cette perspective, il sera peut-être nécessaire de prendre en compte ces contraintes afin d'assurer

les débits minimaux pour le refroidissement des centrales nucléaires sur le Rhône ou de permettre une irrigation suffisante des cultures du sud de la France par exemple. Ces nouvelles préoccupations pourraient avoir des répercussions sur la gestion de l'eau dans les zones de montagne. L'adaptation du modèle développé à ces nouvelles échelles de gestion pourrait permettre d'envisager les possibilités d'évolution du système de gestion de l'eau et son impact sur les ressources en eau afin de favoriser une vision globale de cet élément.

Ce nouveau modèle semble donc pertinent dans sa forme actuelle et dans ses évolutions possibles pour répondre aux défis de l'adaptation aux changements climatiques pour la gestion durable des ressources en eau.

La prise en main de ce dernier par l'ensemble des acteurs du territoire, tant décideur politique, technicien territorial ou citoyen a aussi été une préoccupation de ce travail.

Cette première tentative de conception de modèle couplé dynamique entre représentation des ressources hydrologiques et représentation de leurs utilisations anthropiques s'est montrée particulièrement pertinente pour explorer les possibilités d'adaptation d'un territoire. Son transfert via des interfaces ludiques comme les Serious-Games est également prometteuse. De nombreuses perspectives d'évolution de ces deux outils conjointement ou en parallèle sont maintenant envisagées. Elles permettront dans un futur que nous espérons proche de mettre en œuvre efficacement l'adaptation aux changements climatiques dans le domaine de la gestion de l'eau sur tous les territoires en ayant la volonté et le besoin.

---

## Bibliographie

---

- Abt, C. (1987), *Serious games*, 196 pp.
- Achin, C., et E. George-Marcelpoil (2013), Sorties de piste pour la performance touristique des stations de sports d'hiver, *Tourisme & Territoires*, 3, 67–92.
- ACQWA (2013), *A summary for Policy Makers*, ACQWA : Assessing Climate impacts on the Quantity and quality of WAter - A large integrating project under EU Framework Programme 7 (FP7), coordinated by the University of Geneva, Switzerland (2008-2013).
- Alvarez, J. (2007), Du jeu vidéo au serious game : approches culturelle, pragmatique et formelle, Thèse de doctorat, Toulouse 2.
- Amoros, C., et G. Petts (1993), *Hydrosystèmes fluviaux*, no. 24 in Collection écologie, masson éd., 300 pp.
- Amoudry, J.-P. (2002), *Rapport d'information du Sénat, au nom de la mission commune d'information chargée de dresser un bilan de la politique de la montagne*, 408 pp.
- Auer, I., R. Böhm, A. Jurkovic, W. Lipa, A. Orlik, R. Potzmann, W. Schöner, M. Ungersböck, C. Matulla, K. Briffa, et al. (2007), Histalp—historical instrumental climatological surface time series of the greater alpine region, *International Journal of Climatology*, 27(1), 17–46.
- Balseinte, R. (1959), Megève ou la transformation d'une agglomération montagnarde par les sports d'hiver, *Revue de Géographie Alpine*, 47(2), 131–224.
- Barnett, T. P., J. C. Adam, et D. P. Lettenmaier (2005), Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions, *Nature*, 438(7066), 303–309.
- Barraqué, B., L. Isnard, M. Montginoul, J.-D. Rinaudo, et J. Souriau (2011), Baisse des consommations d'eau potable et développement durable, *Responsabilité et environnement*, (3), 102–108.



- Bates, B., Z. W. Kundzewicz, S. Wu, et J. Palutikof (2008), Le changement climatique et l'eau, *Rapport techn.*, publié par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, Secrétariat du GIEC, Genève, éd.
- Begert, M., T. Schlegel, et W. Kirchhofer (2005), Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000, *International Journal of Climatology*, 25(1), 65–80.
- Beniston, M. (2006), Mountain weather and climate : a general overview and a focus on climatic change in the alps, *Hydrobiologia*, 562(1), 3–16.
- Beniston, M., H. Diaz, et R. Bradley (1997), Climatic change at high elevation sites : an overview, *Climatic Change*, 36(3-4), 233–251.
- Berlioz, F., D. De Bruyne, et G. Faure (2008), Les domaines skiables face aux aléas de l'enneigement et la neige de culture, 196 pp., Directeur publication : Christian Mantei.
- Beyerbach, C. (2011), Alpagnes et agro-pastoralisme en Tarentaise et Pays du Mont-Blanc. Traditions, enjeux et perspectives d'avenir., 195 pp.
- Bigot, S., et S. Rome (2010), Contraintes climatiques dans les préalpes françaises : évolution récente et conséquences potentielles futures, *EchoGéo [En ligne]*, (14), 23 pp.
- Bonino, J., et A. Elaphos (2008), Monographie Megève, 28 pp.
- Bonriposi, M. (2013), Analyse systémique et prospective des usages de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre (Suisse), Thèse de doctorat, Université de Lausanne.
- Bourdeau, P. (2008), Les défis environnementaux et culturels des stations de montagne, *Téoros*, 27-2, 23–30.
- Braman, D., et D. M. Kahan (2008), The self-defensive cognition of self-defense, *American Criminal Law Review*, 45, 1—65.
- BRGM (2011), Synthèse de cloture du projet vulcain, mémoire scientifique, 10 pp.
- Brisson, N. (2008), Modéliser la réponse des cultures à la contrainte hydrique avec le modèle stics pour comparer des stratégies et anticiper les changements climatiques, *Innovations Agronomiques*, 2, 9–18.
- Brouwer, R., et M. Hofkes (2008), Integrated hydro-economic modelling : Approaches, key issues and future research directions, *Ecological Economics*, 66(1), 16–22.
- Burton, M. (1989), Experiences with the irrigation management game, *Irrigation and drainage systems*, 3(3), 217–228.
- Caballero, Y. (2011), Vulnérabilité des hydrosystèmes soumis au changement global en zone méditerranéenne - le projet vulcain, in *Changement climatique, biodiversité, invasion*, 7ème journée thématique de la ZABR.
- Caisse des dépôts, . (2009), Climatsphère, la lettre de l'économie du changement climatique, 6 pp.

- Carruthers, I. (1981), A role-playing game for training river basin planning, *River Basin Planning : Theory and Practices*, pp. 265–283.
- Castaigns, W. (2007), Analyse de sensibilité et estimation de paramètres pour la modélisation hydrologique : potentiel et limitations des méthodes variationnelles, Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- Castaigns, W., D. Dartus, F.-X. Le Dimet, et G.-M. Saulnier (2009), Sensitivity analysis and parameter estimation for distributed hydrological modeling : potential of variational methods, *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(4), 503–517.
- Caussanel, J., et E. Chouraqui (1999), Informations et connaissances : quelles implications pour les projets de capitalisation de connaissances ?, *Revue Document numérique*, 3(3-4), 101–119.
- CH2011 (2011), Swiss climate change scenarios, 88 pp.
- Charnay, B. (2010), Pour une gestion intégrée des ressources en eau sur un territoire de montagne. le cas du bassin versant du Giffre (Haute-Savoie)., Thèse de doctorat, EDYTEM - SISEO.
- CIPRA (2004), L'enneigement artificiel dans l'arc alpin - rapport de synthèse, 18 pp.
- CIPRA (2010), *The Alps, People and pressures in the mountains, the facts at a glance*, *Vademecum*, 32 pp.
- CITEPA (2014), Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – format secten, 333 pp.
- commune de Megève (2007), Plan local d'urbanisme, rapport de présentation, 224 pp.
- Condon, L. E., et R. M. Maxwell (2013), Implementation of a linear optimization water allocation algorithm into a fully integrated physical hydrology model, *Advances in Water Resources*, 60, 135–147.
- Convention Alpine, . (2009), Plan d'action changement climatique dans les Alpes, 26 pp.
- Csikszentmihalyi, M. (1997), Flow and the psychology of discovery and invention, *HarperPerennial*, New York, p. 12.
- DDT-Savoie (2009), Gestion durable des territoires de montagne, la neige de culture en Savoie et Haute-Savoie, 88 pp.
- Dickey, M. (2005), Engaging by design : How engagement strategies in popular computer and video games can inform instructional design, *Educational Technology Research and Development*, 53(2), 67–83.
- Dietachmair, J., M. Holzer, W. Pfefferkorn, et A.-S. Pirtscher (2014), From science to practical application, how to transfer climate change knowledge success, 28 pp.
- Durand, Y., M. Laternser, G. Giraud, P. Etchevers, B. Lesaffre, et L. Mérindol (2009a), Reanalysis of 44 years of climate in the French Alps (1958-2002) : methodology, model validation, climatology, and trends for air temperature and precipitation, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(3), 429–449.

- Durand, Y., G. Giraud, M. Laternser, P. Etchevers, L. Mérindol, et B. Lesaffre (2009b), Reanalysis of 47 years of climate in the French Alps (1958-2005) : Climatology and trends for snow cover, *Journal of applied meteorology and climatology*, 48(12), 2487–2512.
- Durant, J. R., G. A. Evans, et G. P. Thomas (1989), The public understanding of science, *Nature*, 340(6228), 11–14.
- EEA, E. E. A. (2007), Climate change and water adaptation issues, 114 pp., doi : ISSN1725-Å§2237.
- EEA, E. e. A. (2009), Regional climate change and adaptation, 148 pp.
- Etchevers, P., et M. Martin (2002), Impact d'un changement climatique sur le manteau neigeux et l'hydrologie des bassins versants de montagne, in *Colloque International "l'eau en montagne" Megève 2002*.
- Euzen, A. (2004), Que se cache-t-il derrière les courbes de consommation d'eau ?, in *Journées Sciences et Techniques de l'Environnement (STE)*.
- Ferrand, N., S. Farolfi, G. Abrami, et D. Du Toit (2009), Wat-a-game : sharing water and policies in your own basin, in *Learn to Game, Game to Learn, International Simulation And Gaming Association 40th Annual Conference*.
- Gauchon, C. (2009), Les hivers sans neige et l'économie des sports d'hiver : un phénomène récurrent, une problématique toujours renouvelée, in *Neige et glace de montagne : Reconstitution, dynamique, pratiques*, pp. 193–204, Collection EDYTEM - Cahiers de Géographie, n°8.
- George-Marcelpoil, E., et V. Boudières (2008), Climate change and mountain touristic territories' vulnerability : for an endogenous reading, in *Conference Managing Alpin Futur*, Innsbruck, Austria.
- Ghiotti, S. (2006), Les territoires de l'eau et la décentralisation. la gouvernance de bassin versant ou les limites d'une évidence, *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie, [En ligne]*, (Dossier 6).
- Gottardi, F., C. Obled, E. Paquet, et J. Gailhard (2008), Régionalisation des précipitations sur les massifs montagneux français à l'aide de regressions locales et par type de temps, *Climatologie*, 5, 7–25.
- Gottardi, F., C. Obled, J. Gailhard, et E. Paquet (2012), Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns : Application over french mountains, *Journal of Hydrology*, 432–433(0), 154 – 167.
- Gredler, M. E. (2004), Games and simulations and their relationships to learning, *Handbook of research on educational communications and technology*, 2, 571–581.
- Harou, J. J., M. Pulido-Velazquez, D. E. Rosenberg, J. Medellín-Azuara, J. R. Lund, et R. E. Howitt (2009), Hydro-economic models : Concepts, design, applications, and future prospects, *Journal of Hydrology*, 375(3), 627–643.

- Immerwahr, J. (1999), *Waiting for a signal : Public attitudes toward global warming, the environment and geophysical research*, 30 pp.
- IPCC (2007), *Bilan 2007 des changements climatiques : contribution des groupes de travail i, ii et iii au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du clima*, 114 pp.
- IPCC (2013), *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1535 pp., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2014a), *Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B : Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]*, 688 pp., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2014b), *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]*, 1–33 pp., Cambridge University Press.
- Keller, F. (2007), *Rapport d'information sur le pilotage de la politique de l'eau*, 58 pp.
- Köplin, N., B. Schädler, D. Viviroli, et R. Weingartner (2012), *Relating climate change signals and physiographic catchment properties to clustered hydrological response types*, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7), 2267–2283.
- Labasse, B. (1999), *La médiation des connaissances scientifiques et techniques, rapport à la Direction Générale xii de la Commission Européenne*, Bruxelles, DG12, 103 pp.
- Langevin, R. . M. E., P. & Mugnier (2008), *Changement climatique dans le massif alpin français*, 85 pp.
- Lankford, B., C. Sokile, D. Yawson, et H. Levite (2004), *The river basin game : A water dialogue tool*, vol. 75, 39 pp., IWMI.
- Le Bars, M., P. Le Grusse, M. Allaya, J. Attonaty, et R. Mahjoubi (2004), *NECC : un jeu de simulation pour l'aide à la décision collective. Application à une région méditerranéenne "virtuelle"*, in *Séminaire sur la modernisation de l'agriculture irriguée*, édité par A. D. Ali Hammani, Marcel Kuper, p. 13 p., IAV Hassan II, Rabat, Maroc.
- Le Hir, P. (2015), *Changement climatique : des solutions existent, selon 9 français sur 10 en savoir plus sur*, dernier accès le 20/04/2015.
- Le Lay, M. (2006), *Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydro-climatique : une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso-échelle au Bénin*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG).

- Le Lay, M., et G.-M. Saulnier (2007), Exploring the signature of climate and landscape spatial variabilities in flash flood events : Case of the 8–9 september 2002 cévennes-vivarais catastrophic event, *Geophysical research letters*, 34(13).
- Le Lay, M., S. Galle, G. M. Saulnier, et I. Braud (2007), Exploring the relationship between hydroclimatic stationarity and rainfall-runoff model parameter stability : A case study in west africa, *Water Resources Research*, 43(7), 1944–1973.
- Levrut, A. (2013), *Evaluation de la politique de l'eau*, 134 pp., Conseil Général de l'environnement et du développement durable, Conseil Général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux, Inspection Générale des finances, Inspection Générale de l'administration, Conseil Général de l'Economie, de l'Industrie, de l'Energie et des Technologies, Université Paris-Diderot.
- Linville, P. W., et G. W. Fischer (1991), Preferences for separating or combining events., *Journal of personality and social psychology*, 60(1), 5.
- Loinger, G., et C. Spohr (2004), Prospective et planification territoriales, p. 198.
- Lorenzoni, I., S. Nicholson-Cole, et L. Whitmarsh (2007), Barriers perceived to engaging with climate change among the uk public and their policy implications, *Global environmental change*, 17(3), 445–459.
- Magnier, E. (2013), Neige artificielle et ressource en eau en moyenne montagne : impacts sur l'hydrosystème. Les exemples d'Avoriaz (France) et de Champéry (Suisse)., Thèse de doctorat, Université Paris-Sorbonne, Université de Lausanne.
- Marnezy, A., et J.-P. Ramploux (2006), Retenues d'altitude et neige de culture dans les Alpes françaises du Nord : caractéristiques, répartitions, alimentation en eau, impact sur les milieux, in *2ème congrès international "l'eau en montagne"*, *Gestion intégrée des Bassins Versants*, Megève.
- Martin, E., et P. Etchevers (2005), Impact of climatic changes on snow cover and snow hydrology in the French Alps, in *Global Change and Mountain Regions, Advances in Global Change Research*, vol. 23, édité par U. Huber, H. Bugmann, et M. Reasoner, pp. 235–242, Springer Netherlands.
- Massarutto, A. (2011), La gestion de l'eau face au changement climatique, 36 pp.
- MEDD (2004), Plan climat, 88 pp.
- MEDDE (2013), Rapport de la France sur l'état des lieux et des politiques d'atténuation, 178 pp.
- MEDDTL (2011), Plan national d'adaptation au changement climatique, 188 pp.
- MEEDDAT (2009), Neige de culture, état des lieux et impacts environnementaux, note socio-économique, 162 pp.

- Menzel, S., et M. Pütz (2013), *Climate Adaptation Policies and Governance in Alpine Countries, Transnational Synthesis Report of Work Package 4 in the C3-Alps project*, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL).
- Michon, T. (2015), Extension du potentiel de la modélisation hydrologique. Inversions heuristiques de modèles pluie-débit pour l'identification des paramètres simultanément aux pluies ou à la courbe de tarage., Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- Moser, S. C. (2010), Communicating climate change : history, challenges, process and future directions, *Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change*, 1(1), 31–53.
- Moser, S. C., et L. Dilling (2004), Making climate hot, *Environment : Science and Policy for Sustainable Development*, 46(10), 32–46.
- Moser, S. C., et L. Dilling (2011), Communicating climate change : closing the science-action gap, *The oxford handbook of climate change and society*. Oxford University Press, Oxford, pp. 161–174.
- Musy, A., C. Higy, et E. Reynard (2014), *Hydrologie 1 : une science de la nature, une gestion sociétale*, Ingénierie de l'environnement, 2ème édition revue et augmentée éd., 489 pp.
- ODIT (2009), Les chiffres clés du tourisme de montagne, 63 pp.
- OFEV (2012), Impacts des changements climatiques sur les eaux et les ressources en eaux, rapport de synthèse du projet «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro), 78 pp.
- OIEAU (2009), *Organisation de la gestion de l'eau en France*.
- O'Neill, S., et S. Nicholson-Cole (2009), "Fear won't do it" promoting positive engagement with climate change through visual and iconic representations, *Science Communication*, 30(3), 355–379.
- ONERC (2007), Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique, 97 pp.
- ONERC (2008), Changements climatiques dans les alpes : Impacts et risques naturels, 100 pp.
- ONERC (2012), L'adaptation de la France au changement climatique, 80 pp.
- Paccard, P. (2010), Gestion durable de l'eau en montagne : le cas de la production de neige en stations de sport d'hiver, Thèse de doctorat, EDYTEM - SISEO.
- Pepin, N., et J. Lundquist (2008), Temperature trends at high elevations : patterns across the globe, *Geophysical Research Letters*, 35(14).
- Prensky, M. (2004), Computer games and learning : Digital game-based learning, McGraw-Hill.
- RAEE (2007), *Changement climatique, comment s'adapter en Rhône-Alpes*, Région Rhône-Alpes, Lavoisier éd.

- Reynard, E. (2001), Aménagement du territoire et gestion de l'eau dans les stations touristiques alpines. le cas de Crans-Montana-Aminona (Valais, Suisse), *Revue de Géographie Alpine*, 89(3), 7–19.
- Reynard, E., M. Bonriposi, O. Graefe, K. Herweg, C. Homewood, M. Huss, M. Kauzlaric, H. Liniger, E. Rey, R. Stephan, B. Schädler, F. Schneider, et R. Weingartner (2013), *MontanAqua. Anticiper le stress hydrique dans les Alpes – Scénarios de gestion de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre (Valais). Résultats finaux et recommandations*, Universités de Berne, Lausanne et Fribourg.
- RMS (2008), *Remontées Mécaniques Suisses : Faits et Chiffres*, Remontées Mécaniques Suisses.
- RMS (2014), *Remontées Mécaniques Suisses : Faits et Chiffres*, Remontées Mécaniques Suisses.
- Rousseau, A., A. Mailhot, M. Slivitzky, J. Villeneuve, M. Rodriguez, et A. Bourque (2004), Usages et approvisionnement en eau dans le sud du Québec. Niveau des connaissances et axes de recherche à privilégier dans une perspective de changements climatiques, *Canadian Water Resources Journal*, 29(2), 121–134.
- Rousset, N. (2012), Economie du changement climatique. Des politiques d'atténuation aux politiques d'adaptation, Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- Ruben, B. D. (1999), Simulations, games, and experience-based learning : The quest for a new paradigm for teaching and learning, *Simulation & Gaming*, 30(4), 498–505.
- régie des eaux Megève (2013), Rapport sur le prix et la qualité des services (RPQS).
- région Rhône-Alpes (2008), Schéma régional de développement du tourisme et des loisirs, 11 pp.
- Sahli, A., et M. Jabloun (2012), Mabilia method, url = <http://www.weap21.org/webhelp/MabiliaAlgorithms.html> (dernier accès 20.04.2015).
- Saulnier, G., W. Castaings, D. Hohenwallner, A. Brancelj, I. Bertoncelj, M. Brenčič, A. Brun, M. Cadoux-Rivollet, O. Cainelli, C. Calvi, et al. (2011a), Monitoring and modelling of mountain water resources : A short guideline based on the results of Alp-Water-Scarce., *Rapport techn.*, Alp-Water-Scarce (Interreg IVB, Alpine Space Programme).
- Saulnier, G., W. Castaings, C. Reszler, D. Hohenwallner, A. Brancelj, I. Bertoncelj, M. Brenčič, A. Brun, M. Cadoux-Rivollet, O. Cainelli, et al. (2011b), Climatic scenarios guideline, *Alp-Water-Scarce (Interreg IV B, Alpine Space Programme)*, pp. 1–13.
- Saulnier, G.-M. (1996), Information pédologique spatialisée et traitements topographiques améliorés dans la modélisation hydrologique par topmodel, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Saulnier, G.-M., et R. Datin (2004), Analytical solution to a bias in the topmodel framework balance, *Hydrological Processes*, 18(7), 1195–1218.
- Saulnier, G.-M., et M. Le Lay (2009), Sensitivity of flash-flood simulations on the volume, the intensity, and the localization of rainfall in the Cévennes-Vivarais region (France), *Water Resources Research*, 45(10).



- SCERCL (2009), Etude diagnostique du réseau d'eau potable, *Rapport techn.*, Société de Conseils Etudes et Réalisations pour les Collectivités Locales.
- Scherrer, S. C., C. Wüthrich, M. Croci-Maspoli, R. Weingartner, et C. Appenzeller (2013), Snow variability in the swiss alps 1864–2009, *International Journal of Climatology*, 33(15), 3162–3173.
- Schiele, B., M. Amyot, et C. Benoit (1994), *When science becomes culture : World survey of scientific culture*, boucherville, quebec : university of ottawa press éd.
- Singh, R., K. Subramanian, et J. Refsgaard (1999), Hydrological modelling of a small watershed using MIKE SHE for irrigation planning, *Agricultural Water Management*, 41(3), 149–166.
- SNTF (2002), Neige de culture : le savoir et la production, Meylan.
- Soraruff, M. (2012), Dynamiques des alpages de Megève, étude du Mont d'Arbois, Master, Institut de Géographie Alpine.
- Steenhuis, T., R. Oaks, R. Johnson, R. Sikkens, et E. Vander Velde (1989), Irrigation rehab : A computer aided learning tool for system rehabilitation, *Irrigation and Drainage Systems*, 3(3), 241–253.
- Sturgis, P., et N. Allum (2004), Science in society : re-evaluating the deficit model of public attitudes, *Public understanding of science*, 13(1), 55–74.
- Takala, M., J. Pulliainen, S. J. Metsamäki, et J. T. Koskinen (2009), Detection of snowmelt using spaceborne microwave radiometer data in eurasia from 1979 to 2007, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 47(9), 2996–3007.
- Tenevia (2012), *Modélisation hydrologique sur le Haut Arly*.
- Tenevia (2014), *Réalisation d'un « outil de modélisation du système naturel et des actions anthropiques », modélisation du potentiel hydroélectrique en fonction de scénarii d'évolution*, Projet Alpine Space Recharge Green.
- Thomas, G., et J. Durant (1987), Why shoul we promote the public understanding of science ?, 1, 1–14.
- Tonn, B., A. Hemrick, et F. Conrad (2006), Cognitive representations of the future : survey results, *Futures*, 38(7), 810–829.
- Toqué, A. (2014), Les Serious-Game ou apprendre en jouant (même quand on est grand), in *Les ateliers de l'information*, n°65.
- Turkle, S. (1995), *Life on the Screen : Identity in the Age of the Internet*, Simon & Schuster Trade.
- Viviroli, D., D. Archer, W. Buytaert, H. Fowler, G. Greenwood, A. Hamlet, Y. Huang, G. Koboltschnig, M. Litaor, J. López-Moreno, et al. (2011), Climate change and mountain water resources : overview and recommendations for research, management and policy, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 471–504.



Ward, D., et K. McKague (2007), Les exigences en eau du bétail, *Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario, Fiche technique n°7-024*.

Wolf, J., et S. C. Moser (2011), Individual understandings, perceptions, and engagement with climate change : insights from in-depth studies across the world, *Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change*, 2(4), 547–569.